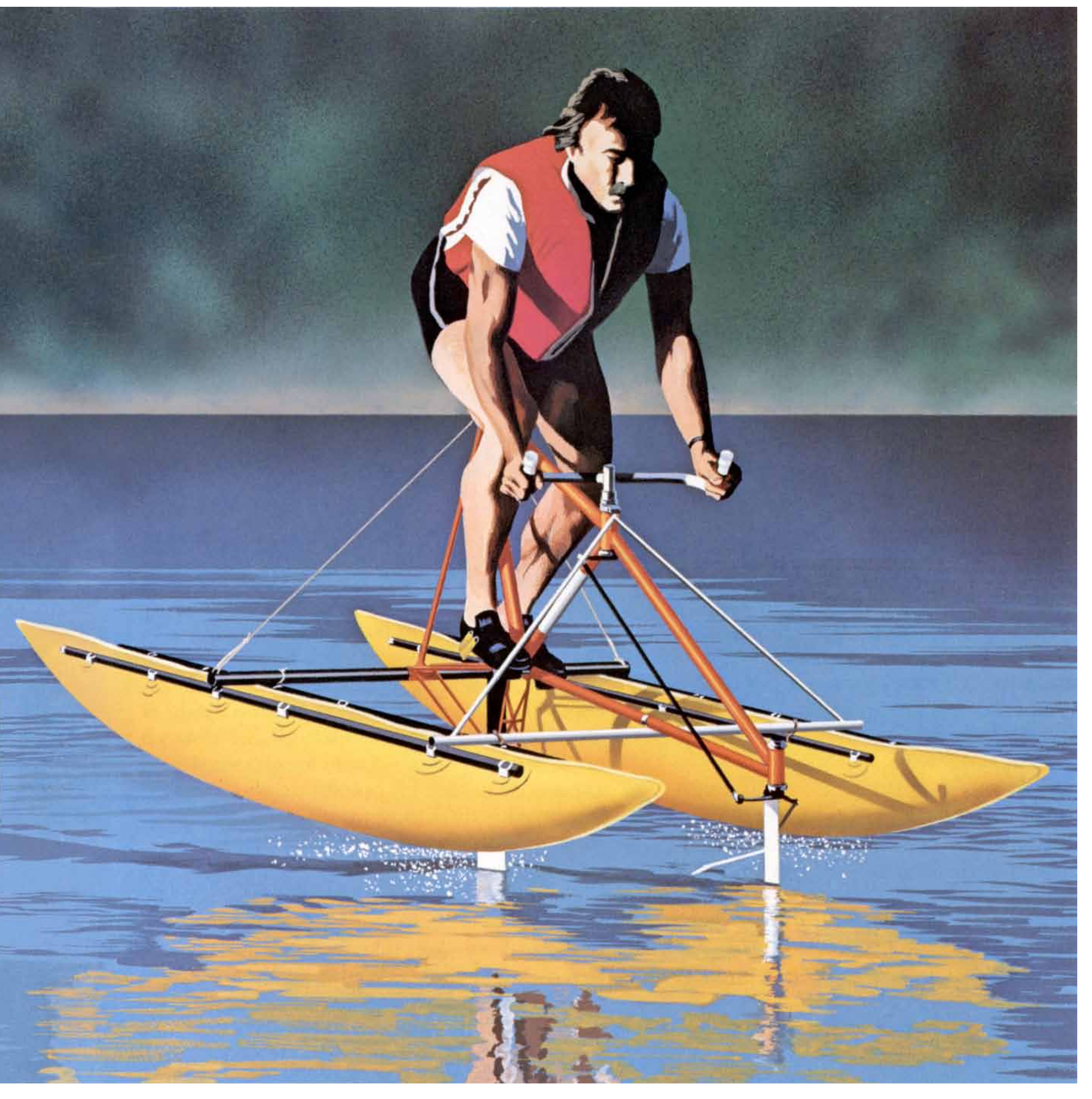
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



HIDRODINAMICA DE PROPULSION HUMANA

Febrero 1987

450 PTAS.
(IVA INCLUIDO)

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 125
Febrero 1987

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
REDACCION Carlos Oppenheimer, José María Farré Josa
PRODUCCION César Redondo Zayas
PROMOCION EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S.A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (ESPAÑA)

SCIENTIFIC AMERICAN

DIRECTOR EDITORIAL Jonathan Piel
REDACCION Armand Schwab, Jr. (Subdirector), Timothy Appenzeller, John M. Benditt, David L. Cooke, Jr., Ari W. Epstein, Gregory R. Greenwell, John Horgan, Robert Kunzig, James T. Rogers, Ricki L. Rusting, Karen Wright
DIRECTOR ARTISTICO Samuel L. Howard
DIRECTOR DE PRODUCCION Richard Sasso
PRESIDENTE HONORARIO Gerard Piel

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Antonio Fernández-Rañada: *Caos;* Ramón Pascual: *Materia oscura del Universo;* Santiago Torres Martínez: *El primer retrovirus humano;* Ana García García: *Arquitectura funcional de la retina;* Ginés López González y María Rosa López González: *Respuesta de las raíces a la gravedad;* Donato Franco Carrera: *Hidronaves de tracción humana;* Antonio Blanco Freijeiro: *Un complejo de apartamentos romanos;* Luis Bou: *Juegos de ordenador;* J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Libros:

Juan Ramón Medina Precioso y Agustín Albarracín Teulón



LA PORTADA

El dibujo de la portada muestra la nave de tracción humana *Pez Volador II* a la velocidad de competición, cuando ya no se sostiene sobre sus dos flotadores, sino en sus dos hidroperfiles, o alas subacuáticas. La embarcación constituye un ejemplo de los nuevos diseños que están desafiando a los cascos tradicionales, o barcas de remos de competición, en las mejores marcas (véase "Hidronaves de tracción humana", por Alec N. Brooks, Allan V. Abbott y David Gordon Wilson, en este número). El *Pez Volador II* cubre un recorrido de 2000 metros en 10 segundos menos que la marca establecida por un solo remero en un casco. Su velocidad límite sobre cortas distancias es de alrededor de 13 nudos, unos 6,5 metros por segundo. El gobierno de la embarcación apenas difiere del que requiere una bicicleta: una cadena de transmisión corre a lo largo del hueco de la columna del ala principal y conecta los pedales a una hélice.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números):
4950 pesetas (IVA incluido)
Extranjero:
Un año (12 números): 35 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
450 pesetas (IVA incluido)
Ejemplar atrasado extraordinario:
575 pesetas (IVA incluido)

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
O'Donnell, 18, 4.º J - 28009 Madrid
Teléfonos 275 88 85 - 275 90 85
Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3.º, 3.ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45

Controlado por O.J.D.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Ted Lodigensky

Página	Fuente	Página	Fuente
9-15	F. F. de la Rosa, M. A. de la Rosa, A. G. Fontes, G. Gómez y E. Ruberte	62	Richard H. Masland
17	Bill Sanderson y James P. Crutchfield	63-64	Alan D. Iselin
18-19	Andrew Christie	65	Ramon F. Dacheux y Elio Raviola
20	James P. Crutchfield	69	Randy Moore
21	Andrew Christie (*arriba*), James P. Crutchfield (*abajo*)	70	Patricia J. Wynne
22-23	James P. Crutchfield	71	Randy Moore
24	Harry L. Swinney y Anke Brandstäter, Universidad de Texas en Austin	72-74	Patricia J. Wynne
25-26	James P. Crutchfield	77	Martyn Cowley
31	Observatorio Palomar	78-82	Hank Iken
32-34	George Retseck	85	John Moss, cortesía de La Superintendencia Arqueológica de Ostia
36	Michael J. Kurtz	86-90	Tom Prentiss
37-40	George Retseck	91	Tom Prentiss (*arriba*); John Moss, cortesía de La Superintendencia Arqueológica de Ostia (*abajo*)
45-46	George V. Kelvin	93	David Di Francesco, Pixar
47	Bernard Kramarsky	94	Lucasfilm Ltd.
48-51	George V. Kelvin	95	Johnny Johnson
52	Fernando De Noronha	96	David Di Francesco, Pixar (*arriba*); MacDonald-Dettwiler y Pixar (*abajo*)
53-54	George V. Kelvin	97	David Di Francesco, Pixar
57	Richard H. Masland	99-100	Michael Goodman
58	Julie H. Sandell	101-102	© Minotaur Designs
59-60	Alan D. Iselin		
61	R. Masland (*centro y abajo*)		

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa, S.A.
Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

FRANCISCO F. DE LA ROSA, MIGUEL A. DE LA ROSA, AGUSTIN G. FONTES Y CARLOS GOMEZ-MORENO ("Producción fotoquímica de peróxido de hidrógeno") son profesores de la Facultad de Biología de Sevilla, los tres primeros, y de la Facultad de Ciencias de Zaragoza, el último. F. F. de la Rosa, tras doctorarse en Sevilla en 1975, se trasladó a la Universidad de Rice de Houston, donde permaneció hasta 1978. A su regreso se reincorporó a la Universidad hispalense, donde actualmente simultanea los estudios sobre fotosíntesis artificial y sobre la estructura y función de las proteínas transportadoras de electrones. M. A. de la Rosa es doctor por la Universidad de Sevilla desde 1981, habiendo realizado trabajos de investigación sobre la función de las flavinas en la flavoproteína reductora del nitrato. A. G. Fontes viene trabajando sobre los sistemas fotobiológicos de aprovechamiento de la energía solar. C. Gómez-Moreno obtuvo el grado de doctor en 1973. En 1975 se trasladó a Estados Unidos para ampliar su formación en la Fundación Kettering de Yellow Springs y en el Veterans Administration Hospital de San Francisco. En 1983 se incorporó a la Universidad de Zaragoza. Sus trabajos de investigación se han centrado en las enzimas reductoras del nitrógeno inorgánico y en la estructura de las flavoproteínas.

JAMES P. CRUTCHFIELD, J. DOYNE FARMER, NORMAN H. PACKARD y ROBERT S. SHAW ("Caos") empezaron a investigar en colaboración sobre sistemas caóticos cuando formaron un grupo de estudio propio (el Colectivo de Sistemas Dinámicos) siendo alumnos de licenciatura en física de la Universidad de California en Santa Cruz. Crutchfield es becario postdoctoral de la Universidad de California en Berkeley. Cursó la carrera en Santa Cruz. Farmer trabaja desde 1982 en el Laboratorio Nacional de Los Alamos. Se licenció en física por la Universidad de Stanford, en 1973, y se doctoró por Santa Cruz en 1981. Packard es miembro del departamento de física y del centro de investigación sobre sistemas de computación de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Shaw se licenció por el Harvard College en 1972 y se doctoró por Santa Cruz en 1980. Durante su estancia en Santa Cruz los autores intentaron valerse de sus conocimientos sobre teoría de los sistemas dinámicos para acertar a la ruleta, pero aprendieron en bolsillo propio cuán difícil resulta predecir los estados de los sistemas aleatorios.

LAWRENCE M. KRAUSS ("Materia oscura del universo") tiene firmado contrato de profesor asistente de los departamentos de física y de astronomía de la Universidad de Yale, desde 1985. Estudió en la Universidad de Carleton, Ottawa, y realizó su trabajo de licenciatura en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, por el que se doctoró en 1982.

ROBERT C. GALLO ("El primer retrovirus humano") dirige un grupo del Instituto Nacional del Cáncer de los Estados Unidos. Sus investigaciones se centran en el estudio de retrovirus asociados con ciertas formas de cáncer y con el SIDA. Procedente del Jefferson Medical College, por el que se licenció en medicina en 1963, ingresó en el Instituto Nacional del Cáncer, donde, en 1972, se le nombró jefe del Laboratorio de Biología Celular de tumores. El equipo de Gallo ha contribuido al esclarecimiento del papel de los virus en el desarrollo de leucemias humanas y a la identificación del virus del SIDA.

RICHARD H. MASLAND ("Arquitectura funcional de la retina") es profesor de fisiología de la Facultad de Medicina de Harvard. Se licenció por el Harvard College y se recibió de doctor por la Universidad McGill. De 1968 a 1971 disfrutó de una beca de postdoctorado en la Facultad de Medicina de Stanford, y posteriormente se trasladó al Hospital General de Massachusetts. En 1975 pasó a Harvard.

MICHAEL L. EVANS, RANDY MOORE y KARL-HEINZ HASENSTEIN ("Respuesta de las raíces a la gravedad") han desarrollado investigaciones anatómicas y fisiológicas sobre el mecanismo de respuesta gravitatoria en las plantas. Evans, doctor por la Universidad de California en Santa Cruz, enseña botánica en la estatal de Ohio. Moore es profesor asociado de biología de la Universidad de Baylor. Sus estudios sobre la respuesta de las plantas a la gravedad nacieron de su interés por la anatomía de las células de la raíz. Moore cursó el primer ciclo de carrera en la Universidad A & M de Texas, prosiguiendo su formación en las universidades de Georgia y de California en Los Angeles. Hasenstein es investigador del laboratorio de Evans. Se licenció y doctoró por la Universidad de Saarland, en Alemania Occidental, en 1977 y 1982, respectivamente.

ALEC N. BROOKS, ALLAN V. ABBOTT y DAVID GORDON WILSON ("Hidronaves de tracción humana") comparten una afición vocacional por la aplicación de la energía humana a varios modos de transporte. Brooks trabaja para AeroViroment, Inc., donde su especialización en dinámica computacional de fluidos le ha permitido desarrollar simulaciones por ordenador del vuelo de las aves. Estudió en la Universidad de Berkeley en California y en el Instituto de Tecnología de California, por el que es doctor en ingeniería civil. Abbott, que se licenció por la Facultad de Medicina de la Universidad de Indiana, es profesor de medicina familiar en la facultad correspondiente de la Universidad del Sur de California. En la actualidad estudia el efecto del ejercicio físico sobre las personas propensas a trastornos coronarios. Abbott ha establecido récords de velocidad con vehículos terrestres de tracción humana, algunos de ellos sobre bicicletas carenadas de su propio diseño y construcción. Wilson enseña ingeniería mecánica en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Nacido en Inglaterra, se educó en la Universidad de Birmingham y en la de Nottingham, que le concedió el doctorado en 1953.

DONALD J. WATTS y CAROL MARTIN WATTS ("Un complejo de apartamentos romanos") son, respectivamente, profesor adjunto y profesora adjunta temporal del departamento de diseño ambiental y arquitectura de la Universidad estatal de Kansas. Donald Watts cursó arquitectura en las Universidades de Nebraska y de California en Berkeley. Carol Watts completa en la actualidad su tesis de historia del arte en la Universidad de Texas en Austin, tras haberse licenciado en arquitectura, en 1975, por la Universidad de Washington. La colaboración entre marido y mujer, de la que es fruto este artículo, empezó con la investigación, por parte de Donald Watts, de ciudades romanas del Cercano Oriente, y prosiguió con los estudios de Carol Watts sobre las casas romanas de Italia.

Hace...

José M.ª López Piñero

... cien años

Falleció en Madrid Rafael Ariza Espejo, figura de importancia central de la constitución en España de dos especialidades médicas: la histopatología y la otorrinolaringología.

Nacido en Ecija en 1826, Ariza comenzó a estudiar medicina en la Facultad de Sevilla, trabajando de mancebo en una botica para mantenerse. Al suprimirse dicho centro en 1845, se trasladó a la Facultad de Cádiz, donde obtuvo el título de licenciado tres años más tarde. Volvió entonces a Sevilla, ciudad en la que permaneció hasta 1873, dedicado al ejercicio profesional. De gran inquietud intelectual y científica, recibió la influencia de los krausistas sevillanos, así como la del cirujano Federico Rubio, al que había conocido durante su período de estudiante en Cádiz. Amplió su formación en el extranjero, trabajando, entre otros sitios, en el laboratorio berlinés de Rudolf Virchow. A su regreso, se encargó de la enseñanza de la histología en la Escuela Libre de Medicina y Cirugía, de Sevilla, creada, tras la Revolución de 1868, por iniciativa del propio Federico Rubio.

Durante los tres últimos lustros de su vida, Ariza residió en Madrid. Enseñó histología normal y patológica en la Escuela Libre de Medicina y Cirugía de Pedro González de Velasco y en la Sociedad Histológica Española, fundada por Aureliano Maestre de San Juan. Dirigió el servicio de otorrinolaringología del Instituto de Terapéutica Operatoria, creado por Federico Rubio en el Hospital de la Princesa, que convirtió en la primera escuela española de dicha especialidad. Además, trabajó activamente como micrógrafo en el laboratorio del Hospital de San Juan de Dios y en el instalado en su propio domicilio.

Ariza fue uno de los principales responsables del predominio de las ideas de Rudolf Virchow entre los histólogos españoles a partir de los años setenta, frente a la influencia que las doctrinas de Charles Robin habían tenido con anterioridad. A este respecto, su *Exposición y juicio crítico de las escuelas histológicas francesa y alemana* (1872) puede considerarse como un hito. Como histopatólogo práctico, contribuyó poderosamente a convertir el estudio micrográfico en tarea habitual en los grupos más exigentes de la medicina madrileña. Entre 1872 y 1887 publicó cerca de treinta trabajos histopatológicos, en su mayor parte en la revista de González de Velasco, *El Anfiteatro Anatómico Español*. Al final de su vida, también se interesó por la microbiología.

Por otra parte, el médico sevillano fue el auténtico fundador de la otorrinolaringología en España. Introdujo la otoscopia y la laringoscopia y organizó, como hemos dicho, el primer servicio de la nueva especialidad. Publicó numerosos trabajos acerca de las enfermedades del oído, en especial sobre los diversos tipos de otitis. No obstante, su contribución más importante corresponde a la laringología. Destacan los estudios que dedicó a los transtornos de la inervación de la laringe y, sobre todo, los que consagró a la tuberculosis laríngea, cuyas formas hipertróficas y vegetantes fue uno de los primeros que describió en Europa.

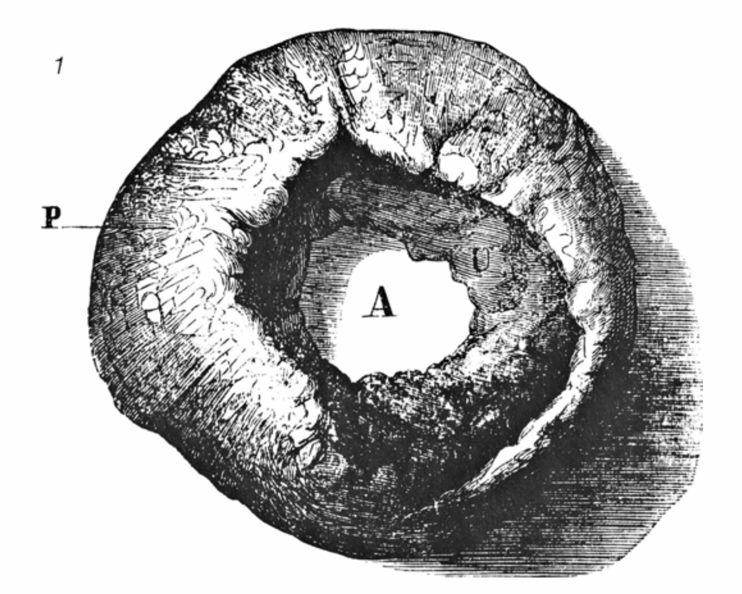
Como ejemplo de la producción científica de Ariza reproducimos a continuación varios fragmentos de un trabajo suyo titulado *Estudio anatomopatológico de un tumor mamario*, que publicó en 1874; la misma fecha, por cierto, en la que, con sólo veintidós años, Santiago Ramón y Cajal se incorporó al ejército español en Cuba como primer ayudante médico:

"En tres zonas hemos considerado dividido (este tumor) para su mejor estudio: primera, superficie ulcerada y capa subyacente, examinadas tanto en el fondo de la ulceración como en sus bordes; segunda, centro constituido por el espesor del tumor hasta llegar a los músculos y a los paquetes de tejido grasoso sobre los cuales descansaba; tercera, la formada por estos mismos tejidos muscular y adiposo, que revestían la cara cruenta de la degeneración.

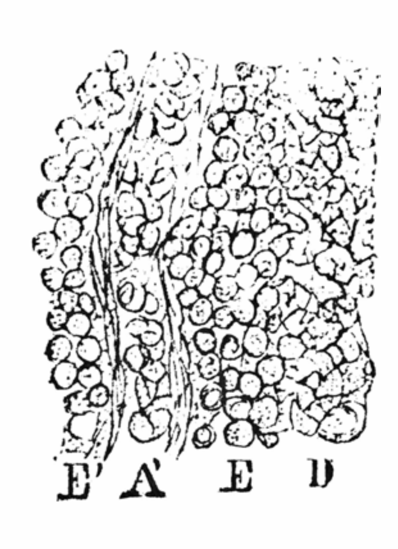
"Correspondientes a la primera zona son las preparaciones números 2, 3, 4 y 5, las que, según el orden en que están colocadas, revelan el sitio de la ulceración de donde se ha tomado. La primera aparece en D granulosa, formada de detritus globulares, semejantes unos a glóbulos de pus, otros a núcleos, muchos a células embrionarias o linfoides, y no pocos a granulaciones proteicas y grasosas, al paso que en E, E′, está formada de células redondas, regulares, de un tamaño igual, constituyendo el tipo perfecto de tejido embrionario. Esta capa E es la subyacente a la superficie libre ulcerada D, de la cual no difiere sino en que muchos de sus elementos celulares se han deshecho y fundido para dar origen a los líquidos secretados por la última. Eran éstos abundantísimos, rojizos y de una fetidez insoportable; caracteres que se explican por la circulación activa de que goza esta parte del tumor según demuestra la existencia de gruesos capilares, por la proliferación embrionaria luxuriante que en ella se verificaba, y por la destrucción rapidísima de estos elementos al llegar a la superficie libre para dar origen a gránulos grasientos, albuminosos, proteicos, bacterioides, etc., que hacen las veces de fermentos productores de la putrefacción en vida y de la feliz característica de que hemos hecho mérito.

"Los números 3, 4 y 5 son cortes practicados perpendicularmente a los bordes de la ulceración, pero que han resultado sin embargo paralelos a la piel que los reviste por estar dichos bordes ranversados hacia el interior de la úlcera. De esto depende que las papilas, cortadas a través, representan círculos o secciones de cilindros, idénticas a las que resultarían si hubiesen sido practicadas según la misma dirección en un epitelioma tubular. Examinadas estas cavidades circulares, se nota perfectamente que sus paredes están formadas de células epitélicas, adosadas las unas a las otras perpendicularmente a la longitud del tubo, mientras que el centro o la cavidad de éste las contiene amontonadas en direcciones diferentes de las que forman la pared. Muchas de éstas han sido expulsadas por el pincel dejando los claros centrales que denotan; hay diferencia estructural entre el continente y el contenido. Basta echar una mirada sobre las papilas 3 y 4, para comprender a qué es debido esta diferencia: las células F y B, colocadas con regularidad alrededor de las paredes del canal, o mejor dicho, que forman esta misma pared, son las correspondientes al re-

1



2



1. **"Figura 1:** *Vista macroscópica del tumor, de ¼ de su tamaño. P, piel. V, superficie ulcerada. A, vacío, o pérdida de sustancia, correspondiente al centro de la ulceración.* **Figura 2:** *Corte perpendicular a la superficie ulcerada. E y E′, tejido embrionario subyacente a la misma. En medio de las dos zonas, V, vaso capilar, repleto de hematites, cuyas paredes empiezan a experimentar la degeneración celular fusiforme. D, destrucción de los elementos embrionarios en la aproximación de la úlcera"*

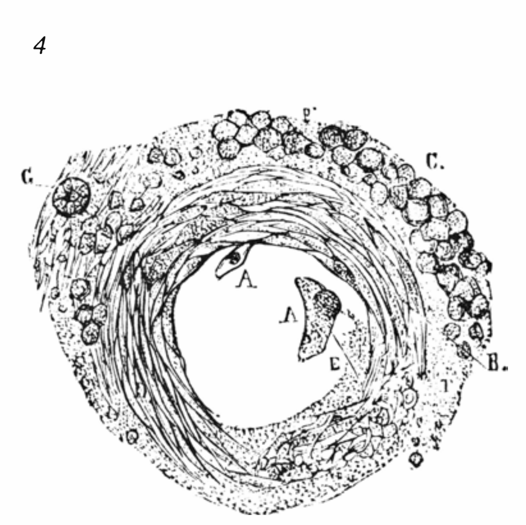
vestimiento epitélico que cubre los mamelones papilares en el estado normal y que penetran profundamente en el dermis para cubrirlos también en toda su longitud a manera de dedo de guante. Dichas células se han multiplicado extraordinariamente y cambiado su forma, pues vemos que las paredes de los tubos están compuestas de muchas capas sobrepuestas afectando el mismo orden y aspecto fibrilar que las que forman las capas más extensas de la epidermis; siendo así que si no estuviesen degeneradas presentarían una fila de células cilíndricas en contacto con la papila, seguirían después las ovales, y últimamente las redondeadas y circulares. Respecto al contenido de estos tubos, claramente se conoce que las células que lo constituyen en E′, núm. 3, y en E, núms. 4 y 5, forman cuerpo aparte del continente y proceden del mismo estroma de la papila atacado de proliferación, el cual presenta las fases embrionaria, epitélica y epidermoidea, como demuestran respectivamente la E del núm. 3, E′, del 4 y E del núm. 5.

"Si para calificar la naturaleza de este tumor nos hubiésemos guiado por lo que de sí arroja el examen de la figura núm. 2, ninguna duda habría quedado de que se trataba de una inflamación proliferente terminada en supuración por el mismo exceso de sus elementos embrionarios; así como no teniendo en cuenta sino los dibujos 3, 4 y 5, que acabamos de estudiar, habríamos sido fieles intérpretes de la observación calificándolo de epitelioma tubular. En efecto; cavidades cilíndricas llenas de células, que es en lo que

3



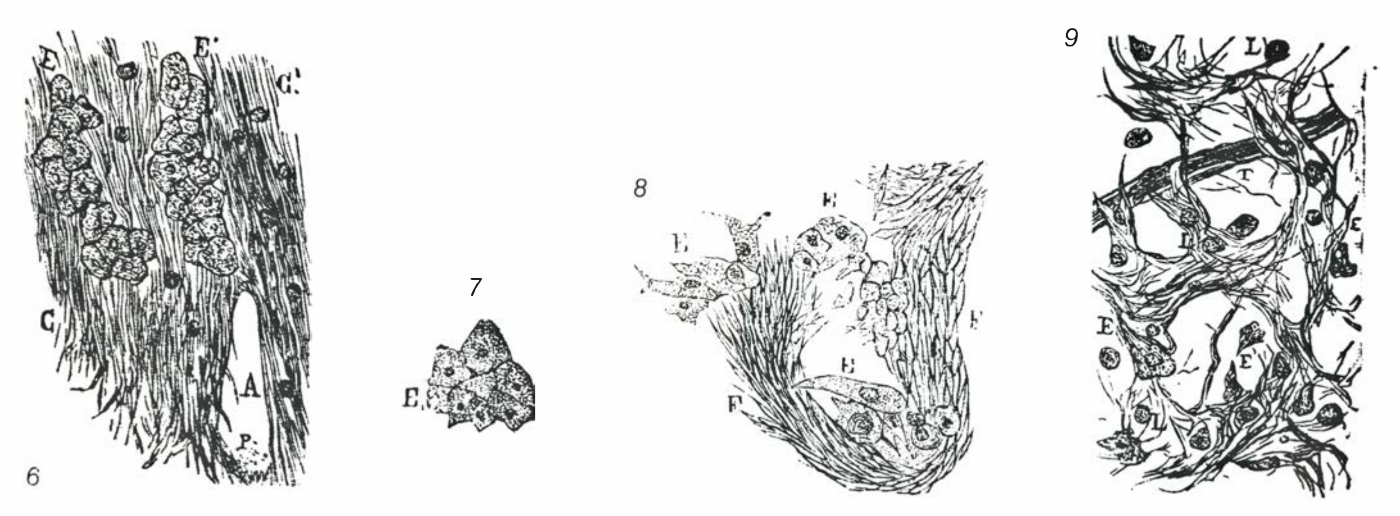
4



5



2. "Estas figuras representan papilas cortadas de través. Las letras R, R′, R″, de la **figura 3,** *indican el cuerpo reticular de Malpigio. Los círculos E, E′ y C, los parénquimas papilares; los cuales en E, E, E, empiezan a proliferar; en E′ alcanzan la degeneración epitélica; en C, la epidérmica. F, células epitélicas vistas de perfil. En la* **figura 4,** *el proceso patológico es el mismo, pero más caracterizado. A, alvéolo papilar, de donde las células epitélicas han sido expulsadas casi en totalidad. A y E, células epitélicas vistas de plano. B, las mismas por sus bordes. G, glándula sudorípara. P, protoplasma. En la* **figura 5,** *el cuerpo de la papila está compuesto de muchas capas de células epidérmicas"*



3. *"Cortes correspondientes al parenquima del tumor.* **Figura 6:** *E y E', células epitélicas alojadas en tejido conjuntivo. C y C', dicho tejido con algunas células linfoides. A, alvéolo vacío. P, protoplasma.* **Figura 7:** *Grupo de células desprendido de su alvéolo.* **Figura 8:** *Cavidad carcinomatosa cuyas paredes presentan la degeneración celular fusiforme. E y E', células epitélicas. F, fusiformes.* **Figura 9:** *Los alvéolos y el estroma simulan el reticulum de una glándula linfática"*

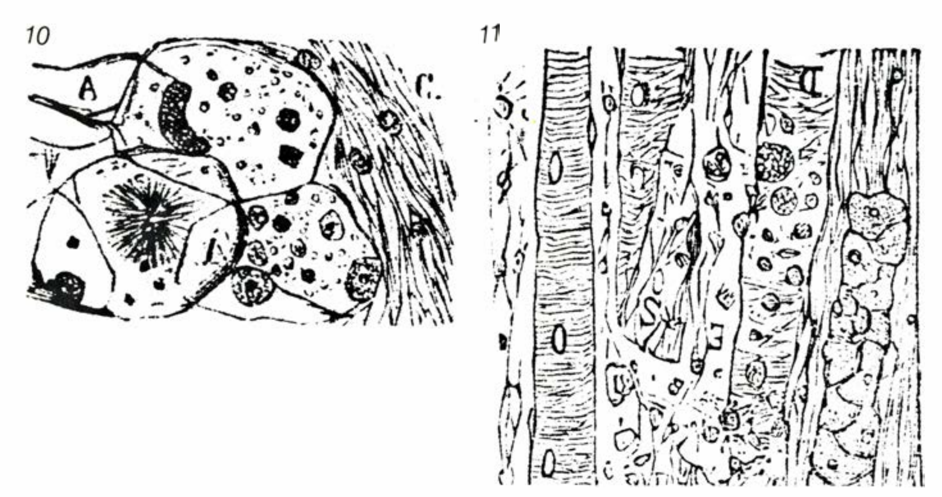
consiste dicha degeneración, se presentan en esta parte del tumor, vecina a la piel ulcerada, con una profusión y riqueza tales, que podemos seguir en ellas paso a paso todos los momentos de la evolución. En el núm. 3 hay papilas que participan todavía de los caracteres del tejido conjuntivo con núcleos o células plasmáticas, mientras otras han entrado ya en la faz embrionaria; en E' del mismo número, y en E del 4, los elementos globulares han pasado a la organización epitélica; en el núm. 5, por último, el proceso evolutivo viene a parar a la forma epidérmica o córnea de las células y a las perlas de la misma naturaleza. Si los tubos de que nos vamos ocupando tuviesen una longitud mayor de la correspondiente al capuchón papilar, y penetrasen la masa del tumor cruzándola en todas direcciones, el diagnóstico de epitelioma tubular sería exacto. Pero antes de aventurar nuestro juicio, pasemos al estudio de lo restante del neoplasma.

"En las figuras 6, 7, 8 y 9, que pertenecen a la zona media de las tres en que hemos dividido el tumor, la alteración de los tejidos se presenta con caracteres distintos de los que hasta el presente llevamos estudiados. La del núm. 6 ofrece nidos de células epitélicas en E, E', en medio de un estroma de tejido conjuntivo finísimo, el cual a su vez se halla atacado de proliferación celular. El alvéolo núm. 8 es el más parecido a la estructura del carcinoma; pero si se estudian con atención las fibras de que al primer aspecto parecen formadas sus paredes, se notará que las tales líneas son células fusiformes agrupadas en haz según su longitud. Tenemos, pues, en este ejemplar un perfecto alvéolo carcinomatoso con la diferencia de que sus paredes en vez de estar constituidas por tejido conjuntivo fibroso lo están por un sarcoma tipo. En el corte núm. 6 las células epitélicas han quedado alojadas en las cavidades prolongadas que ellas mismas se han labrado en el tejido; y aunque éste no ha perdido por completo su carácter fibrilar, se ven sin embargo en medio de las fibras células linfoides, embrionarias y fusiformes que indican el principio de la transformación sarcomatosa. Todo esto se ve más claramente en el núm. 9, de cuyos álveos han sido expulsadas las células epitélicas quedando al descubierto las trabéculas de tejido conjuntivo, en las que pueden perfectamente observarse las modificaciones indicadas.

"Llegamos ya al tejido adiposo y muscular que forman la base o zona posterior del tumor, y a ellos corresponden las figuras 10 y 11. La primera es una pequeña agrupación de células adiposas en contacto con una banda de tejido conjuntivo, colocada en una región lejana del centro activo de la degeneración, pero donde ya empiezan a sentirse los primeros destellos del trabajo patológico. Por eso una de dichas células adiposas está llena de núcleos redondos y ovales que no esperan más que la destrucción de la membrana celular madre para convertirse en células independientes y autónomas; otra tiene su núcleo, granuloso ya y cargado de protoplasma, todavía pegado a la pared de la membrana, porque el trabajo de fertilidad no ha hecho más que iniciarse; algunas, en fin, ofrecen el núcleo desprendido de la pared, libre en el contenido grasiento, y tomando diversas formas, entre las que es digna de llamar la atención la de semiluna o riñón que tiene uno de ellos, lo que indica hallarse próximo a la división endógena. El tejido conjuntivo vecino parece a primera vista normal, pero si bien se examina se notará en él algunas células fusiformes y linfoides que revelan principia a alterarse en su textura.

"En cuanto a los músculos, basta con el examen de sus haces primitivos en la figura 11 para comprender cómo empieza en ellos la degeneración: los núcleos del sarcolemma proliferan, como se ven en S y D, y entran en celulación; la materia sarcódica representada por las estrías transversales y longitudinales de la fibra muscular se atrofia, experimentando primeramente la degeneración vítrea, y después la molecular amorfa; por último, la parte del sarcolemma no convertido en células hace las veces de estroma mixomatoso donde se alojan los elementos proliferantes.

"No queremos dejar de apuntar la observación que, con motivo de los procedimientos empleados para poner de manifiesto los elementos degenerados de la fibra muscular, hemos hecho respecto a la marcha que siguen los núcleos proliferados para convertirse en células epitélicas. Cuando la sustancia contráctil ha complementado su atrofia y desaparecido del todo, la membrana sarcolémmica, falta ya de objeto funcional, se vuelve, de anhista que era, granulosa y plasmática alrededor de los



4. "**Fig. 10:** *Células adiposas cuyos núcleos empiezan a proliferar. C, tejido conjuntivo en idéntico estado.* **Fig. 11:** *Corte correspondiente al tejido muscular. N, fibra muscular. S, sarcolemma proliferado, ... D, fibra en la que ha desaparecido ... la sustancia ... del músculo, ... sustituida por núcleos. C, fibra convertida en ... células epitélicas"*

núcleos, fragmentándose después a cierta distancia de éstos, de manera a dejarlos envueltos en una esfera de protoplasma que hace las veces del cuerpo celular. Esta división del miolemma no puede atribuirse a otra causa que a la influencia ejercida por la actividad del mismo núcleo, irradiándose a distancia para apropiarse un territorio más o menos grande, según su potencia y magnitud.

"No siempre se verifica de un modo tan pasivo la participación que el tejido muscular toma en las degeneraciones cancerosas; lo más frecuente es que éstas sucedan en el orden indicado y que sea el *perimsium* el punto inicial de la transformación patológica; pero no es posible hoy poner en duda que, en ciertos casos, se observan fibras musculares en las que la alteración ha empezado por los núcleos pertenecientes a la sustancia del músculo que se encuentran en el interior de la membrana.

"A pesar de la autoridad de Virchow, Ranvier, Rindfleisch, Sick, Berlin, Henle y Welcker, que no admiten para explicar el desarrollo neoplásico en los músculos otro proceso que la atrofia de sus elementos propios por la sustitución invasora del tejido conjuntivo ambiente atacado de degeneración, es lo cierto que, otros autores, entre ellos Schrödervander Kolk, Neummann, Weber, Förster, Karpowisch, Bardeleben, etc., han visto la proliferación de los corpúsculos musculares dar origen a las células epitélicas del carcinoma en el interior de la membrana sarcolemmica. Menos conformes se hallan los pareceres por lo que respecta a la degeneración sarcomatosa, pues aunque Weber, Förster y Waldeyer han deducido de sus observaciones que el músculo tomaba en este cambio una parte activa, los más han opinado con Virchow, que la proliferación nuclear de la fibra, en vez de ser indicio de su paso a la organización sarcomatosa, lo era de su destrucción y atrofia; exceptuando a Billroth que considera el aumento de los núcleos como principio de la formación de nuevas fibras musculares. Sin embargo, después de las observaciones del Dr. Sokolow de San Petersburgo sobre el sarcoma de los músculos, publicadas en junio del 73 en los *Archivos* de Virchow, puede considerarse como una verdad adquirida para la ciencia que los núcleos de la fibra muscular proliferan, crecen y pasan directamente a convertirse en células de sarcoma. Y sin que nosotros hayamos en el caso presente llevado tan adelante nuestras observaciones para echarlas en la balanza y decidir con ellas discusión tan importante, podemos mostrar preparados que abogan por la participación activa de los músculos, en el carcinoma al menos, que es la degeneración a que han venido a parar algunas fibras musculares examinadas. Mas no dirigiéndose este trabajo a resolver una cuestión que trae tan divididos a los histólogos, reservamos las investigaciones que en este sentido hemos hecho para exponerlas separadamente. Bajo el punto de vista anatomo-patológico, que ha sido nuestro propósito, basta con la figura núm. 11, y con lo que de ella hemos dicho, para comprender la alteración del tejido muscular en el tumor que estudiamos."

Producción fotoquímica de peróxido de hidrógeno

La utilización de las flavinas, reducidas ante la luz y posteriormente reoxidadas por el oxígeno para formar peróxido de hidrógeno, permite almacenar la energía solar en forma de energía química

Francisco F. de la Rosa, Miguel A. de la Rosa, Agustín G. Fontes y Carlos Gómez-Moreno

Ante la crisis energética actual, uno de los objetivos más perseguidos por los científicos y técnicos es el relativo al aprovechamiento de la energía solar para la obtención de compuestos ricos en energía que puedan emplearse como combustible o alimento.

Casi toda la energía que el hombre ha venido consumiendo a lo largo de su historia proviene, en último término, de la radiación solar que, mediante el proceso conocido como *fotosíntesis*, es captada y transformada en energía química por las plantas y algas verdes. En la reacción de la fotosíntesis, la energía de la luz solar provoca la rotura (fotolisis) de la molécula de agua, H_2O, que se descompone en oxígeno, (O_2), e hidrógeno (H_2). (La molécula de hidrógeno no se libera, sino que queda incorporada en moléculas orgánicas complejas, típicas de los seres vivos: hidratos de carbono, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos.)

Se daría un gran paso si consiguiéramos imitar en el laboratorio, y a escala industrial, la función fotosintetizadora de los vegetales, la rotura de la molécula de agua mediante energía luminosa como procedimiento ideal para captar, convertir y almacenar la energía solar.

A tal fin, se han presentado tres opciones. Con la primera, se pretende aumentar el aprovechamiento de la energía solar gracias al desarrollo de especies agrícolas más rentables, y con menos requerimientos nutricionales, capaces de producir una mayor cantidad de material celular, o biomasa, utilizable para su consumo directo como alimento o para la producción de energía en forma de calor, electricidad u otras. En esta misma dirección se encuentran los estudios sobre cultivos no tradicionales, tales como los de algas o microorganismos fotosintéticos, que pueden ser directamente utilizados como fuente de proteínas o como abono.

La segunda opción se refiere a la utilización de sistemas semisintéticos, en los que se emplean cloroplastos enteros extraídos de las células, o bien simples moléculas de clorofila ancladas en soportes adecuados, capaces de funcionar como células fotoelectroquímicas generadoras de corriente eléctrica.

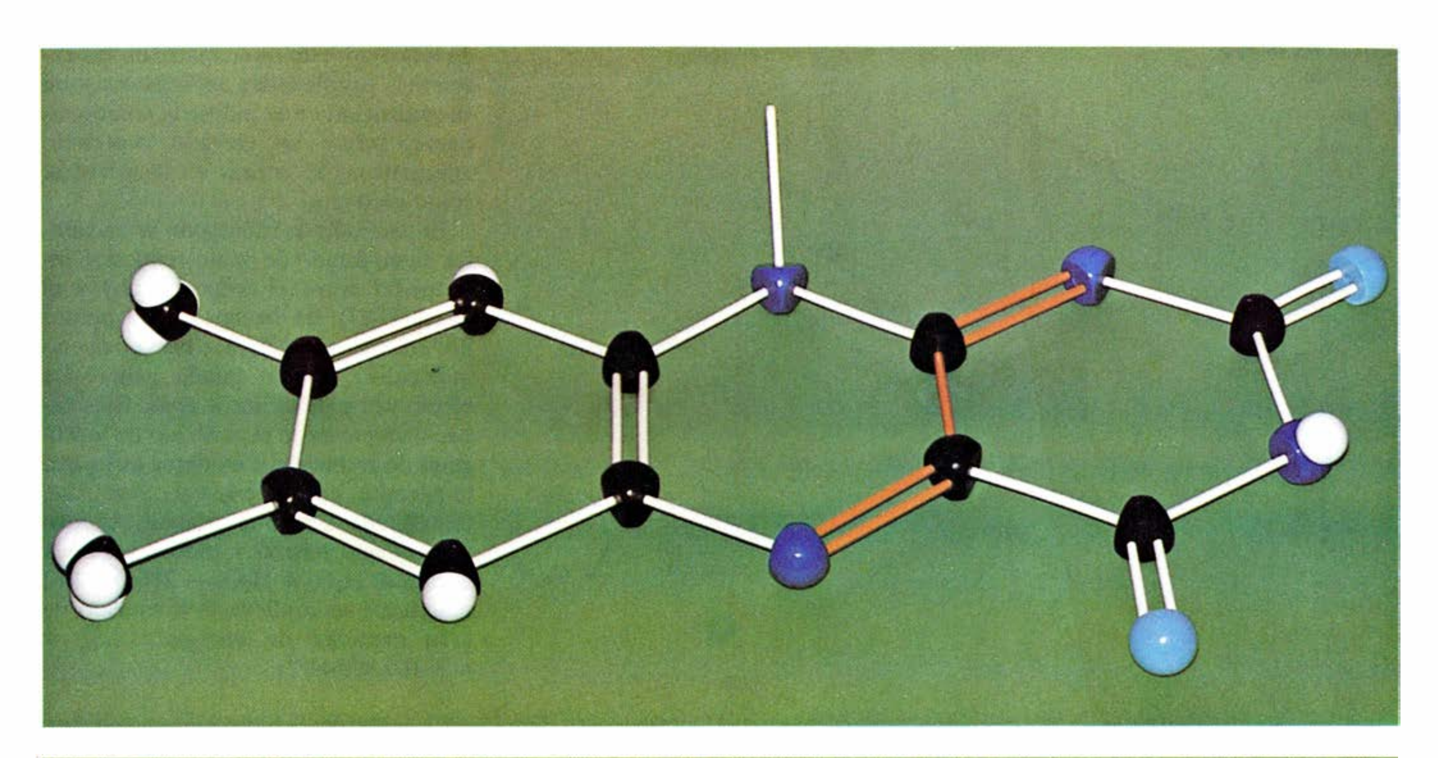
La tercera y última alternativa contempla la construcción de sistemas fotoquímicos artificiales que, basados en el comportamiento de los compuestos excitables por la luz, puedan llevar a cabo la fotooxidación del agua con la consiguiente formación de compuestos altamente reducidos, ricos en energía, utilizables como combustibles.

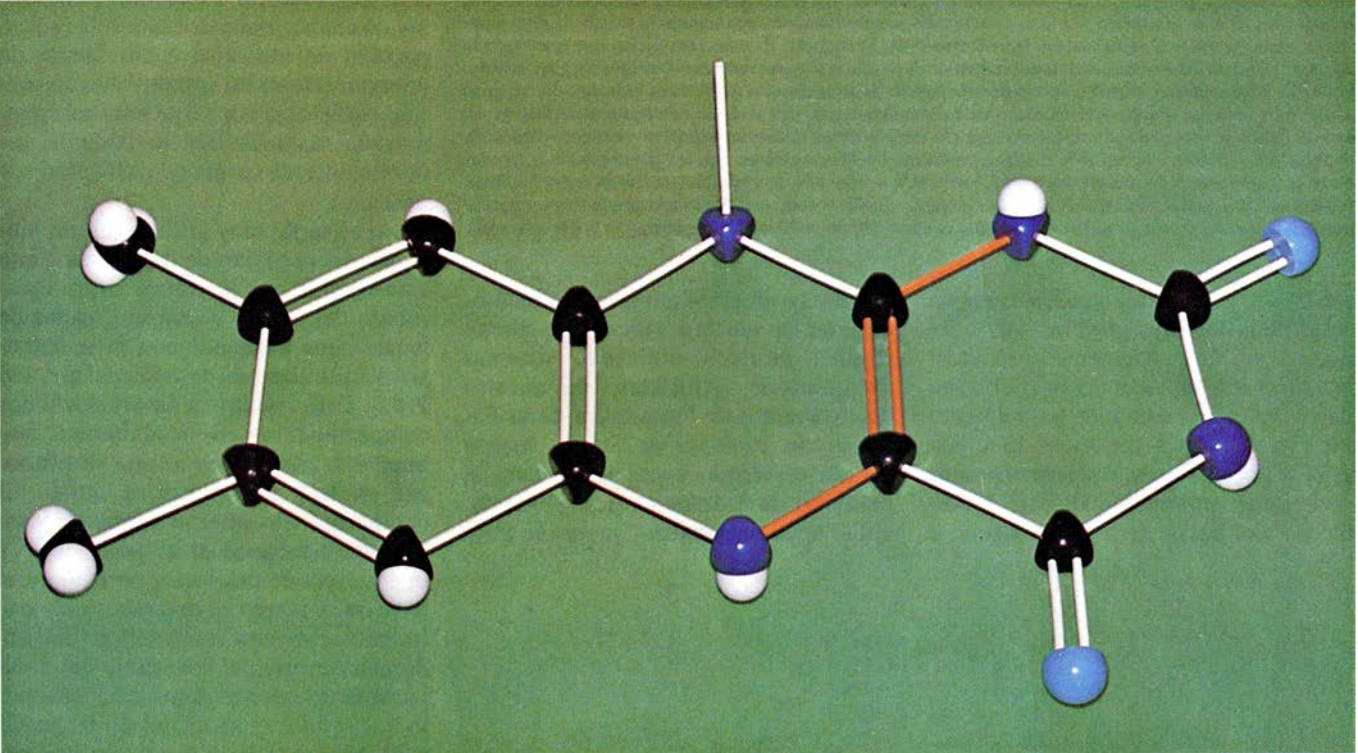
La primera de las tres alternativas citadas abre un campo que, a buen seguro, provocará cambios sustanciales en la situación alimentaria. La segunda opción se ve limitada por su bajísimo rendimiento en la conversión energética, debido a las dificultades en la adaptación del sistema biológico –altamente evolucionado y preparado para su función dentro de la estructura celular– a los modelos *in vitro*. La tercera alternativa, en la que se encuadra este artículo, pretende producir diferentes compuestos energéticos y sustancias de interés para el hombre.

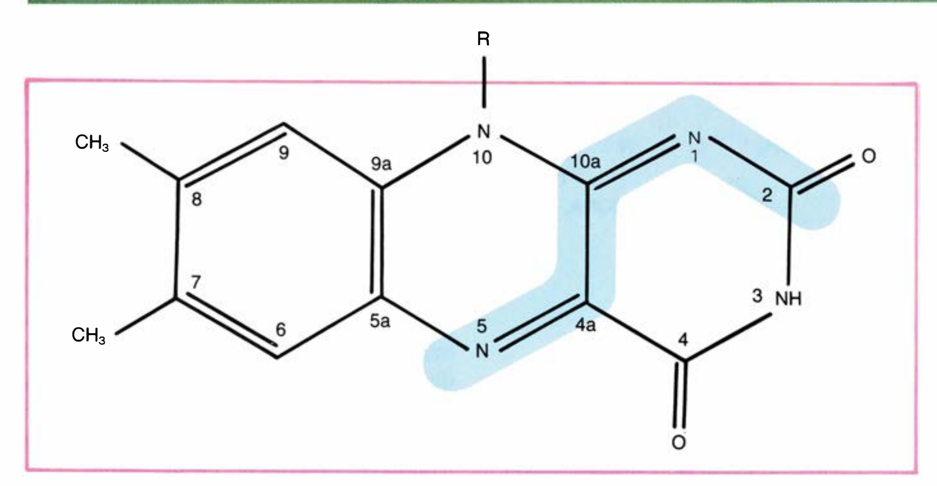
Los sistemas fotoquímicos artificiales se basan en la utilización de compuestos coloreados (pigmentos) capaces de absorber una determinada radiación luminosa, para pasar así a un estado de excitación electrónica. El acto primario de conversión de la energía luminosa consiste en la captación de un fotón (o cuanto de luz) por parte del pigmento, empleándose la energía del fotón en expeler un electrón a un orbital más externo y con más energía. La molécula pasa de su estado fundamental, estable, a un estado excitado, rico en energía e inestable, lo que induce un cambio en su energía de ionización y, cuando es susceptible de oxidarse o reducirse, en su potencial redox, o de óxido-reducción. Esto último ocurre de suerte que, si es la forma oxidada la que absorbe la radiación, el pigmento se vuelve más oxidante al aumentar su afinidad por los electrones; pero si es la reducida, el pigmento se hace más reductor al disminuir su energía de ionización.

Las sustancias que se comportan de este modo se denominan fotosensibilizadores. Desde un punto de vista práctico, interesan sobre todo aquellas cuya absorción de luz tiene lugar en la zona visible o ultravioleta cercana del espectro electromagnético, donde mayor irradiancia presenta la luz solar. Entre estas sustancias adquieren importancia especial las flavinas y otros compuestos estructuralmente relacionados con ellas: las acridinas. También tienen un comportamiento similar ciertos productos artificiales, a saber: azul de metileno, rosa de bengala y, sobre todo, algunos complejos de coordinación de metales de transición como el rutenio, el molibdeno o el cinc.

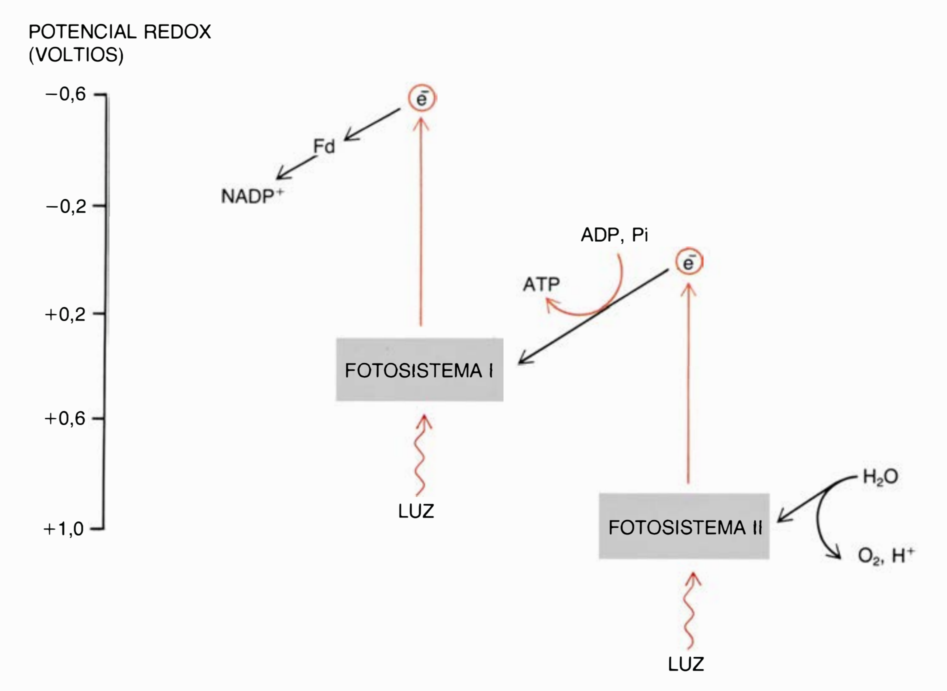
Por otra parte, el funcionamiento de un sistema fotoquímico requiere el consumo de un sustrato que actúe suministrando electrones, ya sea un reductor natural o cualquier otro compuesto estable que dé lugar a la formación de subproductos oxidados de forma irreversible. Idealmente, el donador terminal de electrones debería ser el agua, como ocurre en la fotosíntesis vegetal, pero ello está hoy día lejos de conseguirse de manera eficiente. Para promover la rotura del agua se ha sugerido recientemente el empleo de un derivado alquilado de rutenio –el rutenio (II)-tris (2,2′-bipiridilo)–; se trata de un fotosensibilizador que, al excitarse







1. MODELO DE UNA FLAVINA en sus formas oxidada y reducida (*arriba y centro*). La flavina (del latín *flavus*, amarillo) engloba a un grupo de compuestos caracterizados por poseer el triple anillo 7,8-dimetilisoaloxacina. Mientras que la lumiflavina carece de significación biológica, la riboflavina, conocida por vitamina B_2, constituye el precursor metabólico del flavín-adenín-dinucleótido (FAD) y del flavín-mononucleótido (FMN), importantes coenzimas redox en ciertas flavoproteínas. La fórmula estructural de las flavinas oxidadas se presenta a la izquierda; el grupo cromóforo del anillo, responsable de la absorción de luz y de su actividad catalítica, queda resaltado en la figura en color azul.



2. FLUJO FOTOSINTETICO DE ELECTRONES impulsado por los fotosistemas I y II presentes en los cloroplastos de las plantas y algas verdes o en los cromatóforos de los procariotas fotosintéticos. Ambos fotosistemas, tras su excitación por la luz y actuando secuencialmente, promueven la subida de electrones contragradiente desde el agua hasta la ferredoxina (Fd). El conjunto de estas reacciones, que constituye la fase luminosa de la fotosíntesis, tiene la doble función de producir el poder reductor (ferredoxina y nucleótidos de piridina reducidos) y el poder energético (trifosfato de adenosina, o ATP, cuya hidrólisis libera gran cantidad de energía) que posteriormente van a ser utilizados en una serie de reacciones metabólicas –la denominada fase oscura de la fotosíntesis– para la síntesis de las moléculas orgánicas reducidas típicas de los seres vivos: hidratos de carbono, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos. Son las reacciones de la fase luminosa las que sirven de modelo para los fotosistemas artificiales, que igualmente tienen como finalidad primordial la obtención de determinados compuestos reducidos –combustibles u otros productos de interés– impulsando los electrones procedentes del agua mediante fotosensibilizadores que captan la energía solar.

por la luz, genera una especie química capaz de reducir los protones (H^+) del medio, con la consiguiente formación de hidrógeno molecular (H_2); el complejo oxidado resultante es reducido por los electrones del agua. Este sistema conlleva serios problemas prácticos, fundamentalmente su bajo rendimiento y el hecho de liberar oxígeno e hidrógeno en el mismo compartimento.

Entre los muchos compuestos que se pueden producir utilizando sistemas fotoquímicos artificiales, en nuestro departamento de bioquímica de la Facultad de Biología de Sevilla hemos venido prestando especial atención al peróxido de hidrógeno (H_2O_2) –la familiar agua oxigenada–, ya que se trata de un compuesto que, aparte de sus excelentes propiedades antisépticas y de su utilización en la industria como oxidante, posee un elevado contenido energético y se utiliza en la industria como oxidante.

El peróxido de hidrógeno se encuentra en un estado de óxido-reducción intermedio entre el oxígeno (O_2) y el agua (H_2O); de hecho, puede perder dos electrones y oxidarse hasta oxígeno molecular, o bien puede ganar dos electrones y reducirse a agua. Esta capacidad que tiene el peróxido de hidrógeno de reducirse y oxidarse es lo que le permite, en presencia de iones metálicos o de la enzima catalasa, reaccionar consigo mismo y mudar según la ecuación: $H_2O_2 + H_2O_2 \rightarrow 2H_2O + O_2$; reacción que conlleva la liberación de gran cantidad de energía: $\Delta G_o^1 = -100\ kJmol^{-1}$.

El peróxido de hidrógeno puede considerarse un excelente combustible en cuanto pone de manifiesto su capacidad de utilizarse como fuente de energía. (No es un combustible en sentido estricto, si por tal se entiende quemar una sustancia con un oxidante, generalmente el oxígeno, para producir energía.)

Un ejemplo muy gráfico del uso biológico del peróxido de hidrógeno como combustible nos lo ofrece cierto escarabajo del género *Brachinus*, capaz de lanzar agua hirviendo con fines defensivos utilizando la descomposición del H_2O_2. Este insecto ha desarrollado dos compartimentos en su abdomen, uno interno y otro externo, que desembocan en la parte trasera de aquél. El compartimento interno contiene peróxido de hidrógeno al 25 por ciento, y una mezcla de catalasa y peroxidasa el externo. Cuando el escarabajo es molestado, con una contracción del abdomen descarga el contenido del compartimento interno dentro del externo, lo que produce una explosión lanzando agua hirviendo bajo la presión del oxígeno originado.

Por otra parte, el peróxido de hidrógeno es un fuerte agente oxidante que presenta la ventaja adicional de liberar residuos no contaminados (agua y eventualmente oxígeno), lo que explica su amplia difusión y utilización en la industria química, ya sea para la síntesis de peróxidos minerales y orgánicos o para el blanqueamiento de tejidos y pastas de papel. El empleo del agua oxigenada como fuente de oxígeno data de la segunda guerra mundial, cuando en Alemania se pensó en la posibilidad de sustituir el aire por el peróxido de hidrógeno en las cámaras de

3. EQUILIBRIOS REDOX DE LAS FLAVINAS. La reducción con un electrón de la flavoquinona (*amarilla*) da lugar al radical flavosemiquinona (*rojo* o *azul*); la entrada de un segundo electrón conduce a la flavina totalmente reducida, o flavohidroquinona (*incolora*). (Las flavinas actúan de fotosensibilizadores.)

combustión de los motores Diesel, que de esta forma podían ser utilizados bajo el agua y en la estratosfera, donde las disponibilidades de oxígeno son escasas. También, el agua oxigenada se viene empleando en la propulsión de cohetes, como fuente de energía, al aprovechar la fuerza desarrollada tras la descomposición en oxígeno y vapor de agua de soluciones de agua oxigenada a concentraciones elevadas (85 por ciento o más).

SUSTRATO	K_q (POR MOL Y POR SEGUNDO)	β
Ditioeritritol	$1,3 \times 10^8$	0,25 ± 0,03
Etilendiaminotetraacético	$3,1 \times 10^8$	0,75 ± 0,08
Hidroxilamina	$1,0 \times 10^7$	0,7 ± 0,07
Imidazol	$7,7 \times 10^6$	–
Semicarbazida	$4,8 \times 10^8$	0,85 ± 0,09
Trietanolamina	$5,1 \times 10^8$	0,3 ± 0,03
Tricina	$3,0 \times 10^7$	0,7 ± 0,07

4. RENDIMIENTO DE LA FOTORREDUCCION DE LAS FLAVINAS por diversos sustratos, en condiciones anaeróbicas y *p*H 7. En la tabla, K_q representa la constante de velocidad de la reacción bimolecular entre el estado fotoexcitado de las flavinas y el sustrato usado como donador de electrones; β se define como el cociente entre el número de moléculas producidas de flavohidroquinona y el de flavosemiquinonas. Beta es igual a 0,5 para una simple reacción de dismutación de la semiquinona en quinona e hidroquinona; equivale a 0 para la reacción hacia atrás entre la semiquinona y el sustrato (toda la semiquinona pasa a quinona); y es igual a 1 para la reducción de la semiquinona con un segundo electrón. Por reacción de dismutación se entiende la reacción de oxidación de una molécula por otra, que se reduce, de la misma especie química.

Las flavinas son unos pigmentos biológicos que aparecen como grupos prostéticos en ciertas enzimas y actúan como fotorreceptores primarios en algunos procesos inducidos por la luz azul. Basándose en la facilidad que tienen las flavinas para reducirse cuando se excitan por la luz, así como para reaccionar con el oxígeno y producir peróxido de hidrógeno, se eligieron dichos pigmentos en la construcción de un sistema artificial destinado a la fotoproducción de peróxido de hidrógeno. La flavina actuaría, pues, como pigmento receptor de luz, o fotosensibilizador, con la misión de catalizar la transferencia de electrones desde un compuesto utilizado como donador, que se consumiría en el proceso, hasta el oxígeno. De hecho, las flavinas iluminadas en condiciones anaeróbicas son fácilmente reducidas por compuestos nitrogenados tales como aminoácidos, tioles, aldehídos, ácidos α-hidroxicarboxílicos e hidrocarburos insaturados, según se puede comprobar experimentalmente por la desaparición del color amarillo de la flavina oxidada, lo que indica la formación de flavohidroquinona, o flavina totalmente reducida, que es incolora. En presencia de oxígeno, sin embargo, la flavohidroquinona es rápidamente reoxidada, con la concomitante formación de peróxido de hidrógeno. Tanto la fotorreducción de la flavina como su posterior oxidación son procesos complejos que se encuentran aún sometidos a debate.

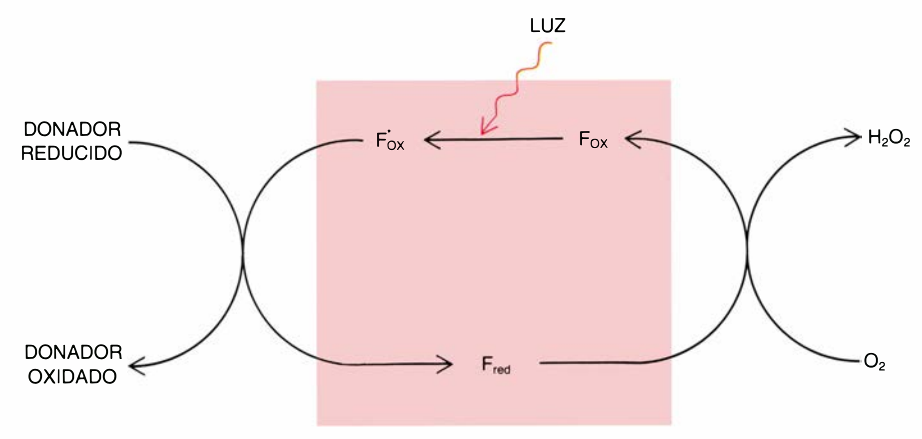
El triple anillo heteroaromático (isoaloxacina) de las flavinas oxidadas posee una serie de dobles enlaces conjugados que son los responsables de que las flavinas absorban la luz azul del espectro visible –de ahí su color amarillo–, así como la radiación ultravioleta cercana, con máximos de absorción a 445 y 370 nanómetros, respectivamente. Tras la absorción de luz, el pigmento queda en un estado excitado rico en energía –la energía de la luz queda almacenada en la molécula excitada–, muy inestable, que desaparece en millonésimas de segundo. No obstante, a pesar de su efímera existencia, y debido a su alto contenido energético, que le proporciona una enorme reactividad química, la flavina excitada puede reaccionar, antes de desaparecer, con otra molécula –incluso consigo misma en un proceso intramolecular– y arrancarle un electrón.

Así pues, cuando la iluminación de las flavinas se realiza en presencia de un sustrato a concentración elevada, el pigmento fotoexcitado puede interaccionar con una molécula de dicho sustrato y oxidarla, quedando aquél reducido. La reacción de óxido-reducción, que no tiene lugar en la oscuridad, es consecuencia directa del aumento del potencial redox de las flavinas iluminadas; de hecho, el potencial de las flavinas en la oscuridad, del orden de −0,22 volt a *p*H neutro, aumenta hasta +1,85 volt en la luz. Por consiguiente, la flavina oxidada puede aceptar un electrón a su potencial más alto y cederlo posteriormente a su potencial más bajo, lo que significa que el electrón aumenta su nivel de óxido-reducción en 2,07 volt. De esta forma, las flavinas excitadas por la luz pueden promover un flujo de electrones contragradiente, desde compuestos relativamente oxidados (pobres en energía) a otros más reducidos (ricos en energía), actuando así de forma parecida a como lo hace la clorofila en los centros de reacción del aparato fotosintético.

Debido a la posibilidad que tienen las flavinas de aceptar uno o dos electrones –y de reducirse, por tanto, a semiquinona o hidroquinona, respectivamente–, el mecanismo de fotorreducción de estos pigmentos, aunque muy estudiado, no ha sido aún definitivamente establecido. De hecho, se han encontrado importantes diferencias en el modo de reacción de las flavinas dependiendo del tipo de sustrato, principalmente, pero también de la temperatura, *p*H, solvente, etcétera. En cualquier caso, parece ser que el carbono 4*a* y el nitrógeno 5 del anillo de isoaloxacina, que juntos forman una base de Schiff, constituyen el sitio catalítico inmediato de las flavinas, si bien el sistema cromóforo (responsable del color) en su conjunto, que se extiende hasta los carbonos 2 y 10*a* y el nitrógeno 1, debería ser considerado una entidad catalítica indivisible.

Nuestro grupo, en colaboración con el profesor Paul F. Heelis del North East Wales Institute (Reino Unido), ha estudiado el rendimiento de varios compuestos nitrogenados y tioles como donadores de electrones para la fotorreducción de las flavinas, con objeto de establecer su posible aplicación en la producción fotoquímica de peróxido de hidrógeno con flavinas como fotosensibilizadores. Para realizar estos estudios se utilizó un láser de neodimio de alta energía, capaz de emitir pulsos de luz monocromática (353 nanómetros) de 20 nanosegundos de duración y 100 milijoule de energía, con lo que se conseguía obtener una elevada población de moléculas de flavinas excitadas. Siguiendo la desaparición de las flavinas excitadas después del pulso, se puede determinar la constante de velocidad y naturaleza de la reacción entre la flavina excitada y el sustrato empleado como donador de electrones.

En ausencia de un sustrato, la flavina excitada desaparece siguiendo una cinética de primer orden con una vida media de 20 microsegundos. En presencia de un donador de electrones, sin embargo, la flavina excitada exhibe una vida media tanto más corta cuanto mayor es la concentración del sustrato añadido, pudiéndose determinar, por tanto, la constante de velocidad de la reacción bimolecular entre ambas es-



5. FOTOSISTEMA FLAVINICO para la producción de peróxido de hidrógeno. La forma oxidada de las flavinas (F^*_{ox}) al excitarse por la luz (F_{ox}) es capaz de extraer electrones de compuestos que en la oscuridad no pueden ser oxidados. Una vez reducida (F_{red}), la flavina reduce el oxígeno molecular (O_2) a peróxido de hidrógeno (H_2O_2). La flavina queda así oxidada, en forma de quinona, y dispuesta a empezar un nuevo ciclo.

pecies. Los diversos sustratos ensayados pueden disponerse, en función de su capacidad para reaccionar con las flavinas excitadas, según el siguiente orden decreciente: trietanolamina, semicarbazida, ácido etilendiaminotetraacético, ditioeritritol, tricina, hidroxilamina e imidazol. En presencia de todos ellos, la caída del estado excitado de las flavinas corría paralela a la aparición del radical flavosemiquinona, lo que indica claramente que la fotorreducción de las flavinas tenía lugar mediante la transferencia de un solo electrón –bien un electrón y luego un protón o directamente un átomo de hidrógeno, ya que la flavosemiquinona a *p*H 7 está protonada–, quedando por consiguiente excluida la entrada de dos electrones para formar directamente flavohidroquinona.

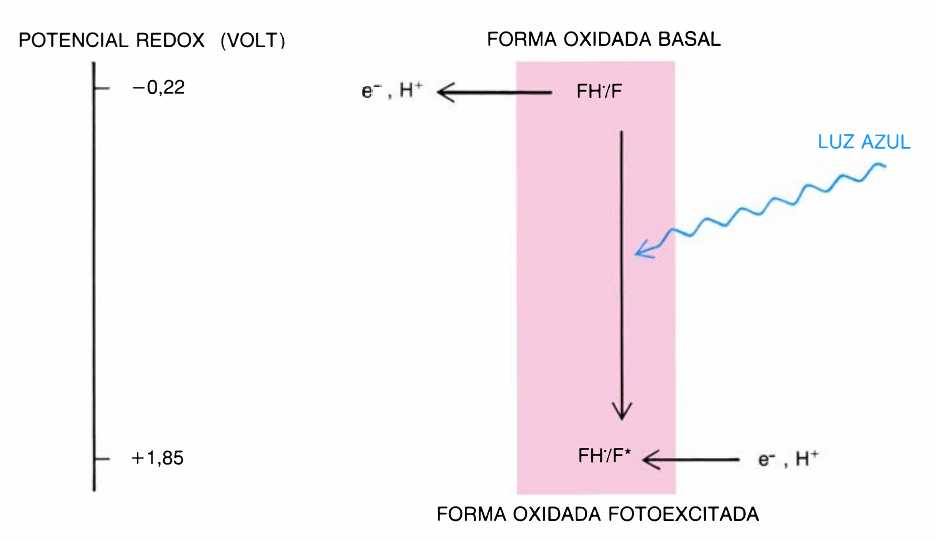
La naturaleza de las reacciones secundarias del radical semiquinona de las flavinas –de una existencia también bastante efímera (no más de 300 microsegundos)– fue igualmente investigada. Según el tipo de sustrato que se empleaba como donador de electrones, aparecían distintos modos de reacción de la semiquinona; a saber: transferencia de un segundo electrón del donador a la semiquinona, dismutación del radical semiquinona a flavoquinona y flavohidroquinona e, incluso, reacción hacia atrás para regenerar las especies originales, esto es, donador reducido y flavina oxidada. El ácido etilendiaminotetracético, la hidroxilamina, la semicarbazida y la tricina parecen reaccionar con la flavosemiquinona y formar flavinas totalmente reducidas; mientras que el ditioeritritol y la trietanolamina interaccionan con la semiquinona para dar flavina oxidada basal, permitiendo incluso la dismutación de la flavosemiquinona.

Evidentemente, el tipo de reacción que experimente el radical semiquinona es de capital importancia en la producción final de flavina totalmente reducida y de peróxido de hidrógeno. Si aceptamos que la flavohidroquinona reacciona con el oxígeno molecular para reducirlo directamente a peróxido de hidrógeno en una reducción única con dos electrones, interesa que el proceso de fotorreducción de las flavinas en su conjunto rinda el máximo posible de flavina en su forma de hidroquinona. Desde este punto de vista, semicarbazida, ácido etilendiaminotetracético, hidroxilamina y tricina, por este orden, se comportarían como los mejores sustratos para la fotoproducción de peróxido de hidrógeno.

En presencia de oxígeno, sin embargo, la flavosemiquinona –especialmente su radical aniónico, de color rojo– produce indirectamente peróxido de hidrógeno: el oxígeno se reduce a radical superóxido (O_2^-) con un electrón donado por la semiquinona, y por dismutación posterior del superóxido se forma peróxido de hidrógeno y oxígeno. Por otra parte, las flavinas fotoexcitadas pueden reaccionar directamente con el oxígeno según una reacción que tan sólo implica la transferencia de energía (la energía de excitación almacenada en el pigmento) desde la flavina al oxígeno, quedando éste en un estado inestable conocido como oxígeno singlete, que, a su vez, puede oxidar a distintos compuestos.

En definitiva, pues, cuando las flavinas se iluminan en presencia de oxígeno y de un sustrato donador de electrones, el pigmento fotoexcitado tiene la posibilidad de reaccionar, bien con el donador, en un proceso de óxido-reducción (mecanismo tipo I), bien con el oxígeno, en un proceso de transferencia de energía (mecanismo tipo II). La contribución relativa de ambas reacciones dependerá de sus constantes de velocidad, que vendrán determinadas por el tipo de sustrato y por las condiciones experimentales. La fotooxidación de la metionina con flavinas transcurre de acuerdo con el mecanismo tipo I en solución acuosa y con el tipo II en soluciones orgánicas, donde la concentración de oxígeno es mayor.

Por esta razón, si bien los estudios de fotorreducción de las flavinas en presencia de diversos sustratos y en condiciones anaeróbicas suministraron una valiosa información sobre las po-



6. AUMENTO DEL POTENCIAL DE OXIDO-REDUCCION DE LAS FLAVINAS en la luz. Las flavinas en su forma oxidada basal (F) pueden absorber fotones azules de 450 nanómetros y quedar en un estado electrónicamente energetizado e inestable (F*), en el que permanece almacenada gran parte de la radiación electromagnética –la diferencia de energía electrónica entre la molécula fotoexcitada y basal es de 2,07 electronvolt–. Ello hace que la flavina excitada tenga una gran afinidad por los electrones, de tal modo que la reducción de la flavoquinona a semiquinona, o viceversa, se realiza a un potencial de −0,22 volt en la oscuridad y de +1,85 volt en la luz. En este hecho radica el funcionamiento de las flavinas como sistema de conversión de la energía luminosa en energía química: las flavinas excitadas por la luz se reducen con electrones de baja energía y se oxidan, ya en la oscuridad, liberando los electrones a un nivel energético superior.

sibilidades de construcción de un sistema fotoquímico artificial para la producción de peróxido de hidrógeno, así como sobre el mecanismo íntimo de funcionamiento del proceso, fue necesario realizar una serie de experimentos que permitieran determinar las posibilidades reales de formación de H_2O_2 por flavinas iluminadas.

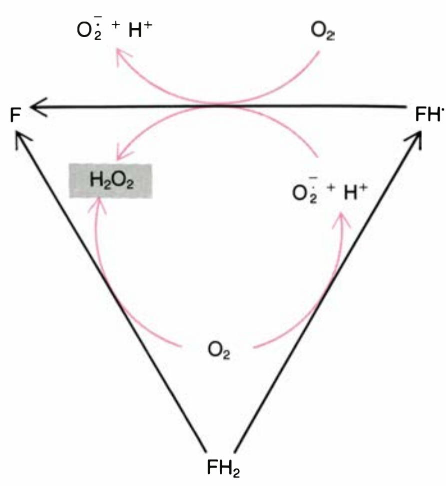
El dispositivo experimental utilizado constaba de una cámara de reacción de material plástico transparente, en la que se encontraban los distintos componentes del fotosistema en solución homogénea: una flavina como pigmento receptor de luz, oxígeno como aceptor de electrones y un sustrato como donador de éstos. Conviene resaltar que, en todo sistema fotoquímico, el espesor o profundidad de la cámara de reacción constituye un factor limitante de gran importancia, siendo necesario maximizar la superficie expuesta a la luz. La cantidad de luz absorbida (densidad óptica, o absorbancia, A) por cualquier solución coloreada –definida como el logaritmo del cociente entre las intensidades de la luz incidente, I_o, y de la luz transmitida, I– depende de la longitud (l, en centímetros) recorrida por la luz a través de la solución y de la concentración (c, en mol l^{-1}) del pigmento en la misma, de acuerdo con la ley de Lambert-Beer: $A = \log (I_o/I) = \varepsilon\, l\, c$, donde ε es la absorbidad molar propia de cada compuesto.

La radiación luminosa es absorbida en las capas más superficiales, pasando a través de ellas hacia las más internas sólo una pequeña proporción de la luz incidente. La cámara de reacción de nuestro sistema experimental tenía forma de paralelepípedo, con 30 centímetros cuadrados de superficie expuesta a la luz y dos centímetros de espesor, y contenía flavina a una concentración de 5×10^{-5} mol l^{-1}; teniendo en cuenta que la absorbidad molar de las flavinas oxidadas es de $1{,}22 \times 10^4$ l mol^{-1} cm^{-1}, tan sólo el 6 por ciento de la luz azul incidente pasaba a través de la solución sin ser absorbida.

La reacción fotoquímica de formación de peróxido de hidrógeno comenzaba al irradiar la cámara de reacción con una fuente de luz blanca, orientada de forma que el haz incidiera perpendicularmente sobre las paredes de aquélla para conseguir una intensidad del orden de 200 watt por metro cuadrado. Simultáneamente, se hacía pasar una corriente de aire impulsada por una bomba peristáltica a través de la solución, aumentando así la concentración de oxígeno disuelto. La cantidad de peróxido de hidrógeno formado en el transcurso de la reacción se calculaba mediante un sencillo método, de gran especificidad, basado en la oxidación enzimática del peróxido con *orto*-dianisidina, formándose un producto coloreado cuya concentración se determinaba por espectrofotometría.

En primer lugar, se estudió el rendimiento de la fotoproducción de peróxido de hidrógeno con los distintos sustratos antes considerados. La semicarbazida –el compuesto que en soluciones anaeróbicas presentó un mayor rendimiento (alrededor del 85 por ciento) en la producción de flavohidroquinona a partir de semiquinona– fue el que exhibió una mayor velocidad de formación del peróxido (del orden de 125 micromoles de H_2O_2 producidos por litro y minuto), velocidad casi tres veces superior a la del ácido etilendiaminotetraacético, que es el compuesto clásicamente empleado en la reducción de las flavinas iluminadas. La tricina, y sobre todo la hidroxilamina, que mostraban una eficiencia similar en la formación de flavina totalmente reducida (70 por ciento), se revelaron ineficientes productoras de H_2O_2. Por el contrario, el ditioeritritol y la trietanolamina, con rendimientos de tan sólo el 25-30 por ciento en la formación de flavohidroquinona, pero con alta capacidad de reacción con las flavinas excitadas, produjeron peróxido de hidrógeno a una velocidad equiparable a la tricina o al ácido etilendiaminotetraacético.

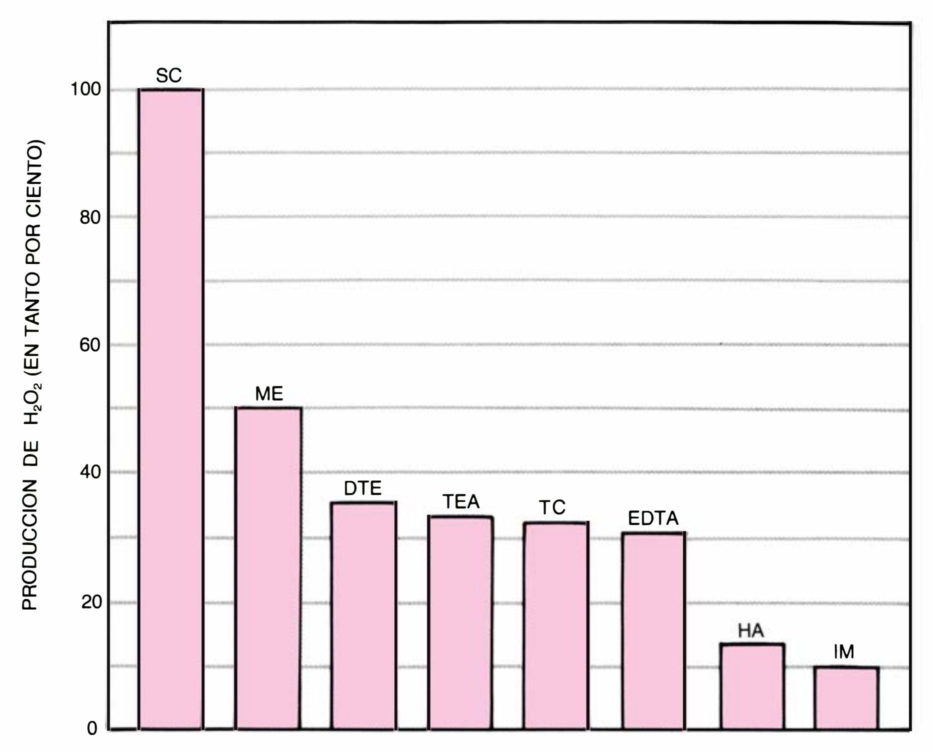
Estas diferencias pueden ser explicadas si se tienen en cuenta las rutas que conducen a la reoxidación con oxígeno de las flavinas reducidas, ya sean semiquinonas o flavohidroquinonas, así como las muy diversas reacciones en las que pueden participar los donadores de electrones con los radicales superóxido, y otras especies reactivas, formados en las reacciones anteriores. En el caso concreto del ácido etilendiaminotetracético, por ser el más llamativo, se estudió el efecto de su concentración sobre la formación de peróxido de hidrógeno, pudiendo observarse que la cantidad final de peróxido formado aumentaba a medida que lo hacía la cantidad de sustrato presente en la mezcla de reacción, hasta llegar a una concentración del orden de 10 milimol l^{-1}; a concentraciones superiores del sustrato se observó un efecto inhibitorio sobre el resultado de la reacción.



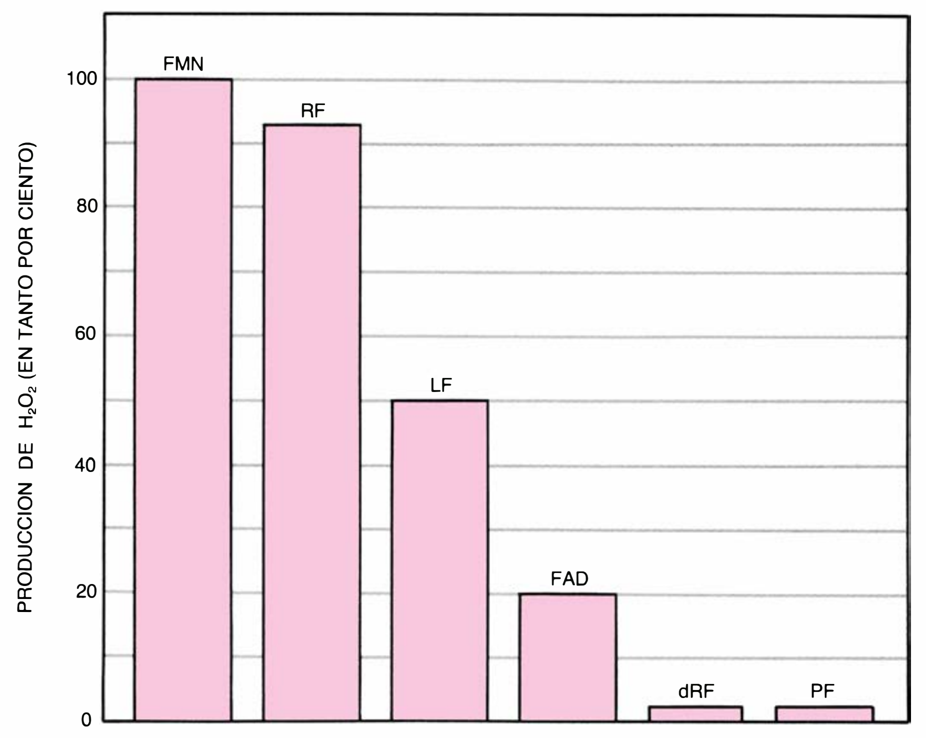
7. VIAS DE FORMACION de peróxido de hidrógeno por reducción del oxígeno con flavinas. La reducción del oxígeno molecuar (O_2) a peróxido de hidrógeno (H_2O_2) requiere la transferencia de dos electrones y dos protones, proceso que puede tener lugar de forma directa, en un solo paso, o indirecta, *via* superóxido (O_2^-). Las rutas más probables de formación de peróxido de hidrógeno con electrones suministrados por las flavinas reducidas –ya sean semiquinonas (FH·) o hidroquinonas (FH_2)– se presentan en la figura. La flavohidroquinona puede reaccionar con el oxígeno molecular para reducirlo a peróxido de hidrógeno o a superóxido, mientras que la flavosemiquinona puede reducir el superóxido a peróxido de hidrógeno y el oxígeno a superóxido. En una reacción independiente no representada, el superóxido puede contribuir a la formación de peróxido de hidrógeno con su propia dismutación.

Se ensayaron distintos tipos de flavinas, e incluso análogos de éstas, como fotosensibilizadores de la formación de peróxido de hidrógeno. El flavín-mononucleótido (FMN) y la riboflavina, y en bastante menor medida la lumiflavina y el flavín-adenín-dinucleótido (FAD), presentaron cierta capacidad de fotoproducción de H_2O_2, pero no así los análogos 5-deazarriboflavina –carente del átomo de nitrógeno en la posición 5 del anillo de isoaloxacina– y la proflavina –derivado de la acridina–, absolutamente ineficaces. En conclusión, el fotosistema ideal para la producción de H_2O_2 parece ser el constituido por FMN como fotosensibilizador y la semicarbazida como donador de electrones.

El rendimiento en la conversión de energía por el fotosistema semicarbazida/FMN se puede determinar, bajo las condiciones experimentales descritas, tomando como base los valores de 125 micromol por litro y por minuto para la producción de peróxido de hidrógeno, 100 kilojoule por mol para el contenido energético del peróxido y 200 watt por metro cuadrado –o, lo que es lo mismo, 200 joule por segundo y metro cuadrado– para la irradiancia. Así, la energía almacenada como agua oxigenada en el volumen total de la célula de reacción (60 mililitros) durante un minuto es de 0,75 joule, mientras que la energía de la luz que durante ese mismo tiempo incide sobre la superficie de la célula (30 centímetros cuadrados) es de 36 joule, lo que se traduce, en términos porcentuales, en el aprovecha-



8. RENDIMIENTO DE VARIOS SUSTRATOS en la fotoproducción de peróxido de hidrógeno. La semicarbazida (SC), molécula trinitrogenada, destaca por su gran eficiencia como donadora de electrones para la producción de H_2O_2 por el sistema fotoquímico de flavinas, permitiendo alcanzar una velocidad de formación del peróxido de 125 micromoles por litro y por minuto. El mercaptoetanol (ME), compuesto azufrado, presenta una capacidad productora del 50 por ciento respecto al anterior. Otros productos más complejos, como el ditioeritritol (DTE), la trietanolamina (TEA), la tricina (TC) y el ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), exhiben un rendimiento mucho más bajo. Por último, la hidroxilamina (HA) y el imidazol (IM) se comportan como ineficaces donadores de electrones. Estas diferencias en los rendimientos observados responden a un diverso grado de eficiencia en la fotorreducción de flavinas excitadas, y también a la naturaleza de las reacciones secundarias en las que intervienen los radicales de flavosemiquinona previamente formados.



9. RENDIMIENTO DE VARIAS FLAVINAS Y ANALOGOS como fotosensibilizadores en la producción de peróxido de hidrógeno. El flavín-mononucleótido (FMN) y la riboflavina (RF) presentan la máxima eficiencia, mientras que el rendimiento de la lumiflavina (LF) es tan sólo del 50 por ciento respecto a los anteriores. El flavín-adenín-dinucleótido (FAD) muestra, a pesar de su analogía con el FMN, una capacidad productora de H_2O_2 del orden del 20 por ciento, probablemente debido al efecto disipador de energía de la adenina. Los análogos 5-deazarriboflavina (dRF) –carente del átomo de nitrógeno en la posición 5 del anillo de isoaloxacina– y la proflavina (PF) –derivado de la acridina– se comportan como deficientes fotosensibilizadores. El hecho de que la 5-deazarriboflavina no sea capaz de catalizar la producción de H_2O_2 pone de manifiesto el papel desempeñado por el átomo de nitrógeno en la posición 5 del anillo de isoaloxacina.

miento de más del 2 por ciento de la energía luminosa que llega al sistema. Este valor es considerablemente superior a los que presentan la mayoría de los fotosistemas estudiados, como, por ejemplo, 0,8 por ciento para los procesos artificiales productores de hidrógeno molecular o 1 por ciento para la propia fotosíntesis vegetal.

Al determinar el rendimiento de los fotosistemas flavínicos en condiciones naturales, esto es, bajo iluminación directa con radiación solar, se observó que la velocidad inicial de formación de H_2O_2 era casi tres veces menor con luz solar que con luz artificial, lo que se debe a la diferencia en su composición espectral y, concretamente, a la mayor cantidad de luz azul –la única absorbida por las flavinas en la zona visible– de las lámparas artificiales. No obstante, la producción final del peróxido al cabo de varias horas de iluminación era equivalente en ambos casos.

Un factor también importante es el *p*H al que transcurre la reacción fotoquímica, ya que las flavosemiquinonas aniónicas, que aparecen a *p*H superior a 8, son mucho más reactivas con el oxígeno que las semiquinonas neutras. Así, en el caso de que la reacción tenga lugar a *p*H alcalino, la semiquinona aniónica producida puede reaccionar con el oxígeno y formar radicales superóxido, que posteriormente darían lugar al peróxido de hidrógeno, y no sería necesaria la reducción de la flavina hasta hidroquinona. En efecto, la fotoproducción de H_2O_2 con semicarbazida y FMN se incrementa en un 50 por ciento o más en presencia de hidróxido sódico a la concentración de 40 gramos por litro, equivalente a un *p*H de 14, aproximadamente.

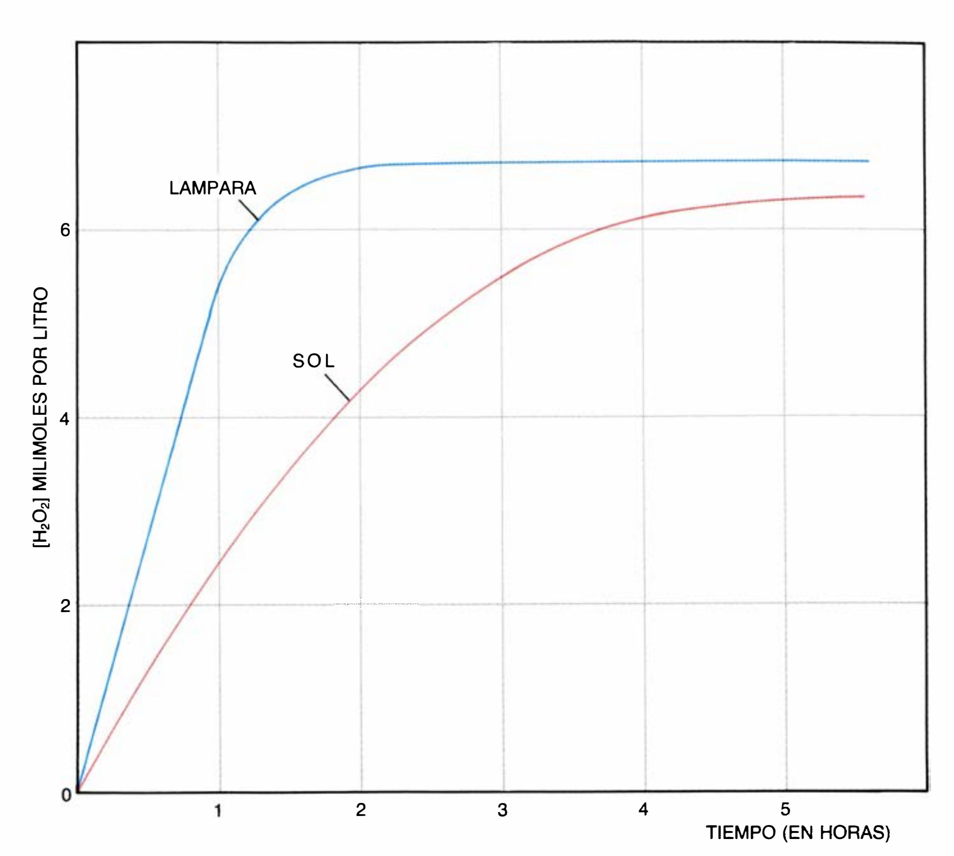
A pesar de haberse observado, especialmente a valores extremos de *p*H, una ligera fotodegradación de los pigmentos flavínicos, conforme progresa la reacción –proceso debido a la alta reactividad de algunas especies formadas en la mezcla de reacción, principalmente radicales de flavina y oxígeno, que atacan al fotosensibilizador y lo destruyen–, se ha utilizado un sistema modelo para la fotoproducción de peróxido de hidrógeno en el que la mayor parte de la flavina original se recupera al final de cada ciclo de producción para ser reutilizada posteriormente. Después de irradiar la cámara de reacción durante varias horas, y una vez que todo el donador de electrones se ha oxidado y formado el peróxido, se realiza la separación de las flavinas del resto de los productos presentes en la mezcla de reacción. Entre los varios

métodos ensayados, la filtración en gel por exclusión de tamaños –las flavinas tienen un peso molecular de casi dos órdenes de magnitud superior al resto de los componentes– es el más prometedor. Las flavinas aisladas pueden llevarse a la concentración deseada y utilizarse en un nuevo ciclo de formación de H_2O_2.

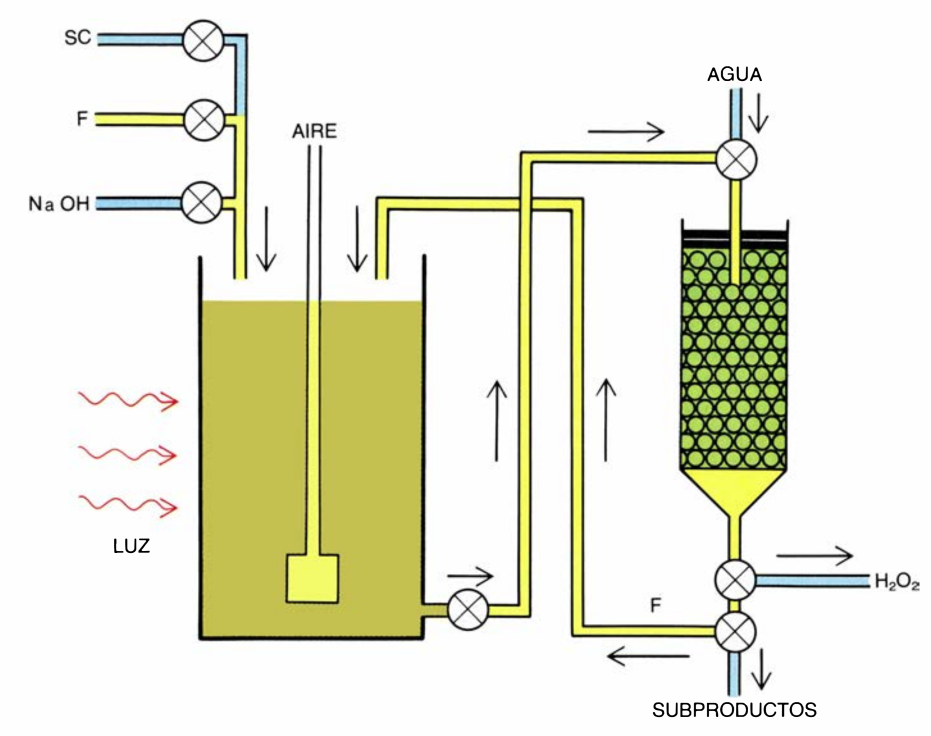
Extrapolando los datos obtenidos en el laboratorio, y aceptando una tasa de producción estable de peróxido de hidrógeno del orden de 125 micromoles por litro y por minuto, se puede hacer una estimación aproximada del rendimiento de una planta piloto semindustrial para la obtención de dicho producto. En una zona intensamente soleada como es el sur de España o las islas Canarias, con una media de casi 3000 horas de sol al año, un reactor que tuviera una superficie iluminada de 100 metros cuadrados y 2 centímetros de profundidad produciría alrededor de 1 a 2 toneladas de agua oxigenada en solución al año.

Uno de los inconvenientes que podrían considerarse, en principio, al llevar a la práctica los fotosistemas flavínicos aquí descritos para la producción de peróxido de hidrógeno es la ya citada fotodegradación del pigmento, proceso que aparece como el principal obstáculo de todos los sistemas fotoquímicos artificiales hasta ahora estudiados. Pero ello no debe extrañarnos. Sabido es que en todo proceso catalítico el catalizador acaba "envenenándose". Sin embargo, una limitación realmente grave de estos sistemas es el alto coste de los sustratos empleados como donadores de electrones, que se consumen en el proceso. El problema hoy en día no es tanto de tipo cinético o mecánico cuanto económico. La rentabilidad del proceso está pendiente, pues, del hallazgo de un material de desecho que pueda emplearse para la reducción de las flavinas iluminadas. Y, cuando se encontraran los catalizadores adecuados (semiconductores, por ejemplo), el donador terminal de electrones podría ser la propia molécula de agua –el potencial de óxido-reducción de las flavinas iluminadas (+1,85 volt, a *p*H 7) es mucho mayor que el del par agua/oxígeno (+0,82, también a *p*H 7)–.

En cualquier caso, cabe suponer que los sistemas fotoquímicos en general, y particularmente el aquí descrito para la producción de un combustible limpio y de calidad como es el peróxido de hidrógeno, podrán ser utilizados en un futuro cercano en países deficitarios en energía no renovable.



10. LUZ SOLAR y luz artificial suministrada por lámpara de wolframio, usadas como fuente de energía, con fines comparativos, en la producción de peróxido de hidrógeno. En ambas se alcanza una concentración máxima de H_2O_2 de 6,5 milimol por litro, si bien el tiempo requerido con luz solar es sensiblemente superior. La diferente composición espectral de ambos tipos de luces es la causa fundamental de la diferencia observada en los rendimientos obtenidos. De hecho, las lámparas artificiales suministran una mayor cantidad de luz azul –la única absorbida por las flavinas y, por tanto, auténticamente efectiva en la producción de H_2O_2– que la radiación solar. En cualquier caso, la producción final del peróxido, horas después, es equivalente.



11. MODELO PROPUESTO PARA LA PRODUCCION FOTOQUIMICA de peróxido de hidrógeno y recuperación del fotosensibilizador. Una vez que todos los componentes del fotosistema –semicarbazida (SC), flavina (F) e hidróxido sódico (NaOH)– se encuentran en la cámara de reacción, ésta se ilumina y airea hasta obtener una concentración máxima del peróxido. Finalizada la fase de producción –esto es, una vez que todo el donador de electrones se ha oxidado y formado el peróxido–, la flavina y el peróxido de hidrógeno se separan del resto de los componentes mediante filtración en gel por exclusión de tamaños. Con un juego de llaves el fotosensibilizador se devuelve a la cámara de reacción para un nuevo ciclo de producción. El hidróxido sódico tiene como única finalidad la de alcalinizar el medio para así acelerar la velocidad de producción.

Caos

Hay orden en el caos: el azar tiene una forma geométrica subyacente. El caos impone límites fundamentales a la predicción, pero también sugiere relaciones causales donde nadie las había sospechado

James P. Crutchfield, J. Doyne Farmer, Norman H. Packard y Robert S. Shaw

El gran poder de la ciencia descansa en la capacidad de relacionar causa y efecto. Basándose en las leyes de la gravitación, por ejemplo, los eclipses se pueden predecir con miles de años de antelación. Hay otros fenómenos naturales cuya predicción no es tan sencilla. Aunque los movimientos de la atmósfera obedecen las leyes de la física en la misma medida que los movimientos de los planetas, las predicciones meteorológicas se realizan todavía en términos de probabilidades. El clima, el flujo de un torrente y el rodar de los dados tienen, todos ellos, aspectos impredecibles. Al no aparecer una relación clara entre causa y efecto, se dice que esos fenómenos poseen elementos aleatorios. Y sin embargo, hasta hace poco tiempo, pocas razones hacían dudar de que la predecibilidad exacta se alcanzara, en principio. Se suponía que bastaría con recoger y procesar una cantidad suficiente de información.

Este enfoque se ha visto alterado por un descubrimiento sorprendente: algunos sistemas deterministas muy simples, con sólo unos pocos elementos pueden generar comportamiento aleatorio. El azar es fundamental; la información no lo esfuma. A la aleatoriedad así generada hoy le llamamos caos.

Una aparente paradoja es que el caos es determinista, generado por reglas fijas que no encierran en sí mismas ningún elemento de azar. En principio, el futuro está enteramente determinado por el pasado, pero en la práctica las pequeñas incertidumbres se agrandan, de suerte que, si bien el movimiento es predecible a corto plazo, no lo es a largo plazo. Hay orden en el caos: bajo el comportamiento errático subyacen elegantes formas geométricas que generan el azar, como ocurre con el tahúr que baraja los naipes o el repostero que bate la masa del pastel.

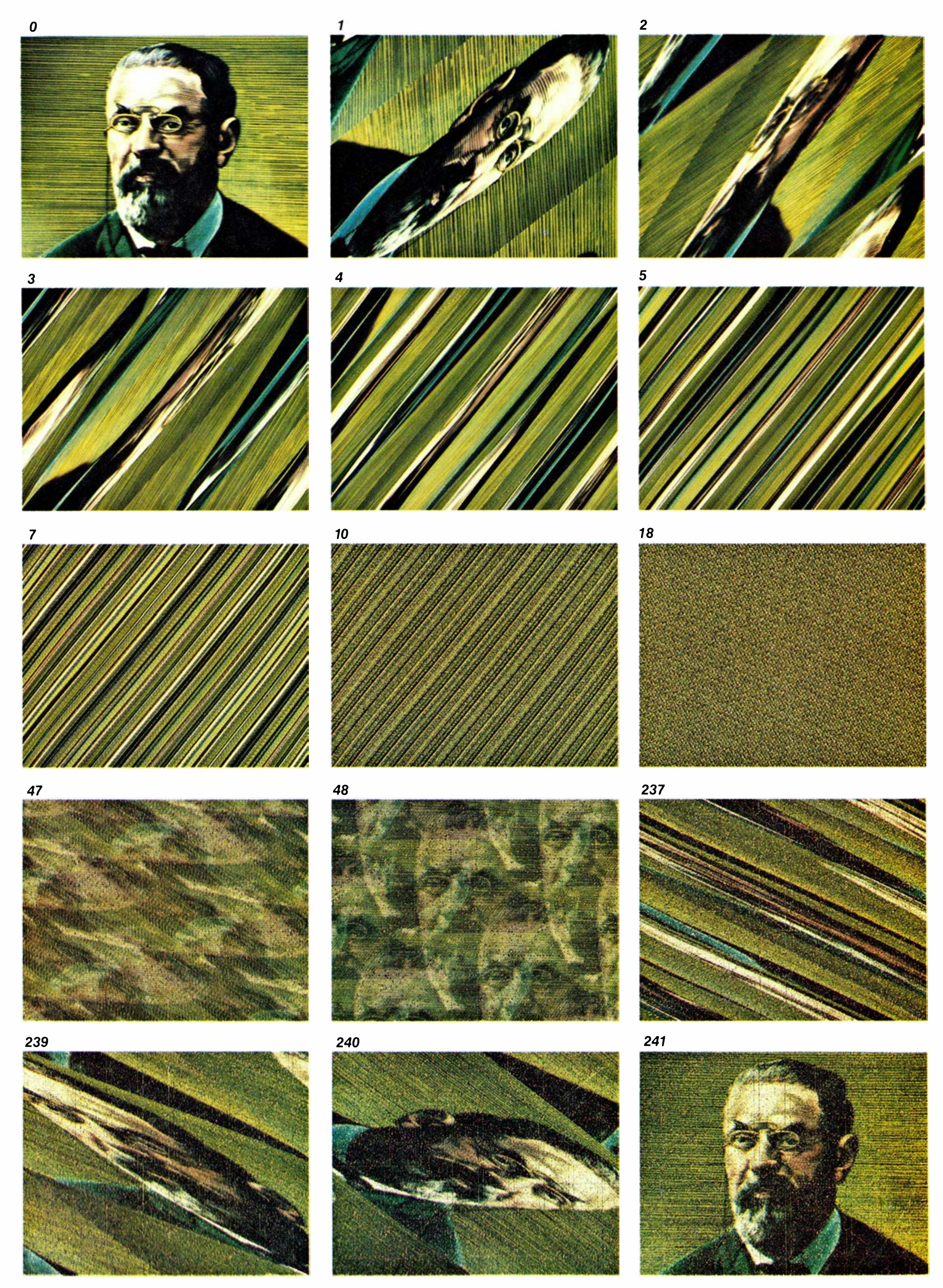
El descubrimiento del caos ha creado un nuevo paradigma en la construcción de modelos científicos. Por una parte, establece nuevos límites fundamentales en la capacidad de avanzar predicciones. Pero, por otra, el determinismo inherente en el caos muestra que muchos fenómenos aleatorios son más predecibles que lo que se había pensado. Mucha información de aspecto aleatorio recogida en el pasado –y archivada porque se suponía demasiado compleja– puede explicarse ahora a través de leyes simples. El caos permite encontrar orden en sistemas tan diversos como la atmósfera, los grifos que gotean y el corazón. El resultado es una revolución que está incidiendo en muchas ramas de la ciencia.

¿Cuál es el origen del comportamiento estocástico? El movimiento browniano ofrece un ejemplo clásico de azar. Si se observa una partícula de polvo a través del microscopio, se ve que sigue un zigzag continuo y errático. Ello se debe al bombardeo que sufre la partícula por las moléculas de agua próximas en agitación térmica. Puesto que las moléculas de agua no se distinguen y su número es muy elevado, el movimiento detallado de la partícula de polvo resulta completamente impredecible. Aquí, la red de influencias causales entre las subunidades puede llegar a ser tan enmarañada, que la pauta de comportamiento resultante se vuelve absolutamente estocástica.

El caos del que trataremos no requiere un número grande de subunidades o de influencias no visibles. La existencia de comportamiento aleatorio en sistemas muy simples nos obliga a reconsiderar las fuentes del azar, incluso en macrosistemas del tenor del clima.

¿Por qué motivo es mucho más difícil predecir el movimiento de la atmósfera que el del sistema solar? Ambos están constituidos por gran cantidad de partes y, ambos también, están gobernados por la segunda ley de Newton, $F=ma$, que puede considerarse un procedimiento sencillo para predecir el futuro. Si las fuerzas F que actúan sobre cierta masa m son conocidas, lo mismo ocurre con la aceleración a. Se sigue de las reglas del cálculo que, si la posición y la velocidad de un objeto pueden determinarse en un instante dado, quedan determinadas para siempre. Es esta una idea tan potente que el matemático francés del siglo XVIII Pierre Simon de Laplace se jactó en cierta ocasión de que, dadas la posición y la velocidad de todas las partículas del universo, él podría predecir el futuro para el resto de los tiempos. Aunque para conseguir este objetivo se interponen varias dificultades prácticas evidentes, durante más de 100 años ningún motivo parecía oponerse a que eso fuese así, al menos en principio. La aplicación literal del apotegma de Laplace al comportamiento humano llevó a la conclusión filosófica de que éste se halla determinado y de que no existe el libre albedrío.

1. ORIGEN DEL CAOS en la operación geométrica del estirado. El efecto se ilustra aquí con un retrato del matemático francés Henri Poincaré, el creador de la teoría de los sistemas dinámicos. La imagen inicial (*arriba a la izquierda*) se digitalizó, de modo que un ordenador pudiese realizar la operación del estirado. Una transformación matemática simple estira la imagen diagonalmente, como si estuviera pintada en una lámina elástica. Cuando la lámina se sale del cuadro se corta y reinserta en el otro lado, como se ve en el panel *1*. (El número escrito sobre cada panel indica las veces que se ha realizado la transformación.) La aplicación repetida de la transformación tiene como efecto revolver la cara (*paneles 2-4*). El efecto neto es una combinación al azar de colores que produce un campo verde homogéneo (*paneles 10 y 18*). A veces ocurre que algunos de los puntos vuelven cerca de sus posiciones iniciales, provocando una fugaz aparición de la imagen original (*paneles 47-48, 239-241*). La transformación aquí mostrada tiene de especial que el fenómeno de "recurrencia de Poincaré" (como se llama en mecánica estadística) ocurre con mucha mayor frecuencia de lo normal; en una transformación caótica típica, la recurrencia es extremadamente rara; quizás ocurra una sola vez en la vida del universo. En presencia de cualquier cantidad de fluctuaciones de fondo, el tiempo entre recurrencias es normalmente tan largo que se pierde toda la información sobre la imagen original.


0
1
2
3
4
5
7
10
18
47
48
237
239
240
241

La ciencia del siglo xx ha presenciado el hundimiento del determinismo de Laplace por dos razones muy diferentes. La primera razón es la mecánica cuántica. Un dogma central de esta teoría es el principio de incertidumbre de Heisenberg, que afirma que hay una limitación fundamental a la exactitud con que se pueden medir la posición y la velocidad de una partícula. Esta incertidumbre proporciona una buena explicación para algunos fenómenos aleatorios; entre ellos, la desintegración radiactiva. Ante la exigüidad del núcleo, el principio de incertidumbre pone un límite fundamental al conocimiento de su movimiento, imposibilitando así obtener suficiente información para predecir cuándo se desintegrará.

Sin embargo, la fuente de impredecibilidad a gran escala debe buscarse en otro sitio. Algunos fenómenos a gran escala son predecibles y otros no lo son. La distinción no tiene nada que ver con la mecánica cuántica. Por ejemplo, la trayectoria de una pelota de béisbol es, de suyo, predecible; un jugador se aprovecha de ello cada vez que la atrapa. Por contra, la trayectoria de un globo que vuela impulsado por el aire que sale del mismo a gran velocidad no es predecible; el globo da tumbos y gira erráticamente en momentos y lugares que es imposible predecir. Pelota y globo obedecen las leyes de Newton; entonces, ¿por qué es el movimiento de éste mucho más difícil de predecir que el de la bola?

El ejemplo clásico de esa dicotomía nos lo ofrece el movimiento de los fluidos. Bajo ciertas circunstancias, el movimiento de un fluido es laminar –constante, estable y regular– y fácilmente predecible con las ecuaciones. Bajo otras, es turbulento –inconstante, inestable e irregular– y difícil de predecir. La transición del comportamiento laminar al turbulento es familiar para todo aquel que haya viajado en avión y pasara súbitamente del aire en calma a una tormenta. ¿Qué provoca la diferencia esencial entre movimiento laminar y turbulento?

Para entender el enigma que esto encierra, imagínese el lector que está sentado al borde de un torrente. El agua corre y salpica como si tuviese ideas propias, moviéndose primero de un modo y luego de otro. Sin embargo, las piedras del lecho del torrente están firmemente sujetas en su sitio y los afluentes entran a velocidades casi constantes. ¿A qué se debe, pues, el movimiento aleatorio del agua?

El físico soviético Lev D. Landau proporcionó una explicación del movimiento estocástico de fluidos que dominó durante muchos años y que consiste en suponer que tal movimiento incluye muchas oscilaciones diferentes e independientes. A medida que el fluido se mueve más deprisa, adquiriendo mayor turbulencia, las oscilaciones entran en movimiento de una en una. Aunque cada oscilación por separado puede ser simple, la complicación del movimiento combinado hace que el flujo resulte imposible de predecir.

Se ha demostrado, sin embargo, que la teoría de Landau no es correcta. El movimiento aleatorio se da incluso en sistemas elementales, sin necesidad de complicación o indeterminación. El matemático francés Henri Poincaré se dio cuenta de ello a finales del siglo pasado cuando indicó que algunos fenómenos impredecibles y fortuitos podían acontecer en sistemas en los que un pequeño cambio en el presente causaba otro mucho mayor en el futuro. La idea es clara si se piensa en una roca en equilibrio asentada en lo alto de una montaña. Basta un leve empujón a un lado o al otro para precipitarla hacia abajo dando tumbos por caminos completamente distintos. Aunque la roca es sensible a pequeños influjos sólo

Laplace, 1776

"El estado presente del sistema de la naturaleza es evidentemente una consecuencia de lo que era en el momento anterior y, si imaginamos una inteligencia que en un instante dado abarcara todas las relaciones entre los entes de este universo, podría decir las posiciones respectivas, los movimientos y las propiedades generales de todos estos entes en cualquier tiempo del pasado o del futuro.

"La astronomía física, la rama del conocimiento que hace el honor más alto a la mente humana, nos da una idea, aunque imperfecta, de lo que sería tal inteligencia. La simplicidad de la ley del movimiento de los cuerpos celestes y las relaciones entre sus masas y distancias permite al análisis seguir su movimiento hasta cierto punto; y, para determinar el estado del sistema de estos grandes cuerpos en los siglos pasados o futuros, le basta al matemático que sus posiciones y velocidades sean conocidas por la observación en cualquier momento del tiempo. El hombre debe esta capacidad al poder del instrumento que emplea y al pequeño número de relaciones que utiliza en sus cálculos. Pero la ignorancia de las diversas causas implicadas en la producción de sucesos, así como su complejidad, junto a la imperfección del análisis, impide que lleguemos a la misma certidumbre sobre la vasta mayoría de los fenómenos. Por ello hay cosas inciertas para nosotros, cosas más o menos probables, y buscamos compensar la imposibilidad de conocerlas determinando su diferente grado de probabilidad. Así es como debemos a la debilidad de la mente humana una de las más delicadas e ingeniosas de las teorías matemáticas, la ciencia del azar y la probabilidad."

Poincaré, 1903

"Una causa muy pequeña que escapa a nuestra atención determina un efecto considerable que no podemos dejar de observar y entonces decimos que el efecto es debido al azar. Si conociésemos exactamente las leyes de la naturaleza y la situación del universo en el momento inicial, podríamos predecir exactamente la situación de ese mismo universo en un momento posterior. Pero, aun cuando se diese el caso de que las leyes de la naturaleza no tuvieran ningún secreto para nosotros, incluso así sólo podríamos conocer la situación inicial *aproximadamente*. Si esto nos permitiese predecir la situación siguiente con *la misma aproximación*, eso es todo lo que necesitamos y diríamos que el fenómeno habríase predicho, que está gobernado por leyes. Pero no siempre es así; puede ocurrir que pequeñas diferencias en las condiciones iniciales las produzcan grandes en el fenómeno final. Un pequeño error en las primeras producirá un abultado error en las segundas. La predicción se hace imposible y aparece el fenómeno fortuito."

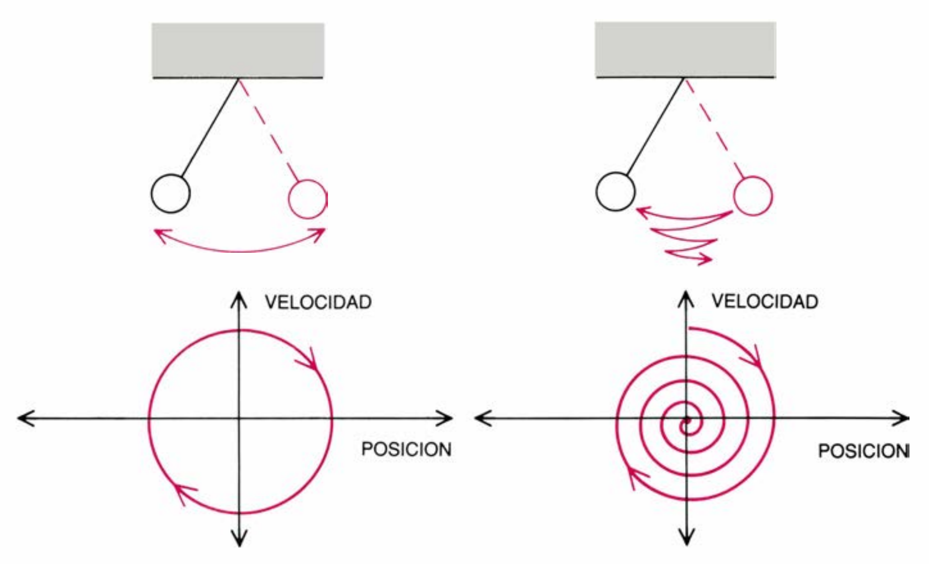
2. OPINIONES DE DOS GRANDES CIENTIFICOS FRANCESES sobre el azar y la probabilidad, contrastadas. El matemático francés Pierre Simon de Laplace afirmaba que las leyes de la naturaleza implican un determinismo estricto y una predecibilidad completa, aunque las imperfecciones de las mediciones exigían introducir la teoría de probabilidades. La cita de Henri Poincaré, físico-matemático y teórico de la ciencia, prefigura el punto de vista contemporáneo de que pequeñas incertidumbres en el estado de un sistema podían multiplicarse con el paso del tiempo, de manera que las predicciones para el futuro lejano fueran imposibles.

cuando está en la cima de la montaña, los sistemas caóticos lo son en cada punto de su movimiento.

Un ejemplo sencillo sirve para ilustrar cuán sensibles pueden ser ciertos sistemas físicos a influencias externas. Imaginemos un juego de billar americano, algo idealizado, en el que las bolas corran por la mesa y choquen perdiendo una cantidad de energía despreciable. Con un simple golpe, el jugador provoca en el juego de bolas una prolongada sucesión de colisiones. Naturalmente, desea conocer el efecto de su golpe. ¿Durante cuánto tiempo podría predecir la trayectoria de las bolas un jugador con un control perfecto de su taco? Si el billarista ignorase un efecto tan minúsculo como la atracción gravitatoria de un electrón situado en el borde de la galaxia, ¡la predicción sería errónea al cabo de un minuto!

El extraordinario aumento de la incertidumbre débese a que las bolas están curvadas, por lo que las pequeñas diferencias en el punto de impacto se amplían en cada colisión. Ampliación que es exponencial: crece en cada colisión, como las reproducciones sucesivas de las bacterias con espacio y alimento ilimitados. Cualquier efecto, por pequeño que sea, adquiere rápidamente proporciones macroscópicas. Esa es una de las propiedades básicas del caos.

El crecimiento exponencial de los errores debido a la dinámica caótica es la segunda razón del hundimiento del punto de vista de Laplace. La mecánica cuántica afirma que las mediciones iniciales no pueden ser totalmente precisas y el caos asegura que las imprecisiones darán, muy pronto, al traste con la capacidad de predecir. Sin el caos, Laplace podría esperar que los errores permaneciesen acotados, o, al menos, que crecieran lo bastante despacio para permitirle avanzar predicciones durante períodos largos. Con el caos, las predicciones están rápidamente condenadas a graves inexactitudes.



3. EL ESPACIO DE CONFIGURACIONES, o de los estados, es un concepto útil para representar el comportamiento de un sistema dinámico. Se trata de un espacio abstracto cuyas coordenadas son los grados de libertad del movimiento de un sistema. Por ejemplo, el movimiento de un péndulo (*esquemas superiores*) está completamente determinado por su posición y su velocidad iniciales. Por ello, su configuración se define por un punto en un plano cuyas coordenadas son la posición y la velocidad (*esquemas inferiores*). Mientras el péndulo oscila de un lado al otro, sigue una "órbita" o camino a través del espacio de configuraciones. En el caso de un péndulo ideal no sometido a rozamiento, la órbita es una curva cerrada (*abajo, a la izquierda*); pero si hubiera rozamiento, la órbita describiría una espiral que se acercaría a un punto (*abajo, a la derecha*).

El marco general del que emerge el caos es la llamada teoría de los sistemas dinámicos. Un sistema dinámico consta de dos partes: la noción de estado (la información esencial sobre un sistema) y una dinámica (una regla que describe cómo evoluciona el estado en el tiempo). La evolución puede representarse en un espacio de configuraciones, construcción abstracta cuyas coordenadas son las componentes del estado. En general, las coordenadas del espacio de configuraciones varían con el contexto; en el caso de un sistema mecánico podrían ser posiciones y velocidades y, en el de un modelo ecológico, las poblaciones de las diferentes especies.

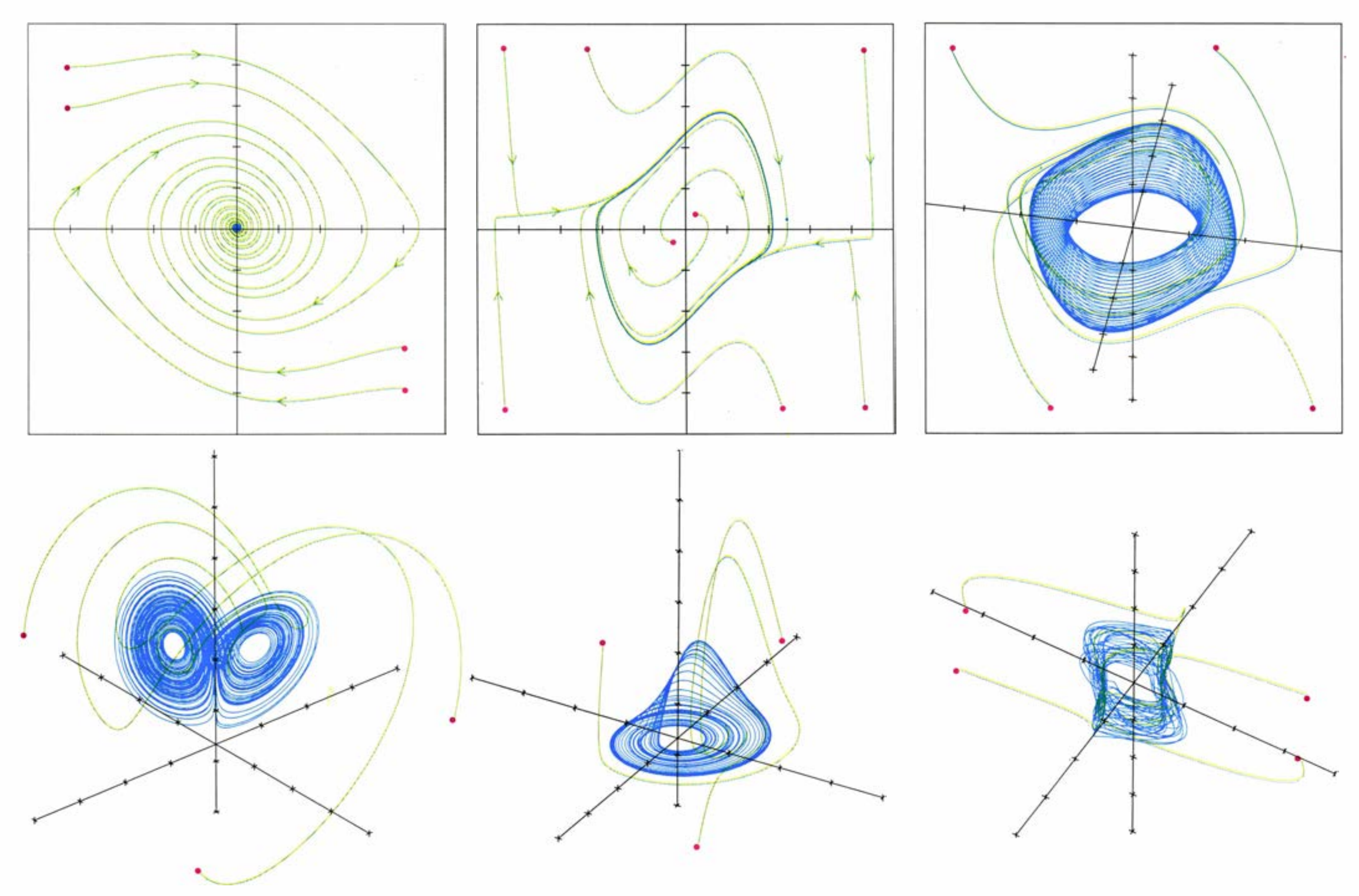
El péndulo simple constituye un buen ejemplo de sistema dinámico. Todo lo que se necesita para determinar su movimiento son dos variables: posición y velocidad. El estado es, pues, un punto en un plano, cuyas coordenadas son la posición y la velocidad. Las leyes de Newton dan una regla, expresada matemáticamente en una ecuación diferencial, que describe la evolución de dicho estado. Conforme el péndulo oscila a un lado y a otro, el estado se mueve a lo largo de una "órbita", o camino, en el plano. En el caso ideal de un péndulo sin rozamiento, la órbita es un ciclo; si no, describe una espiral que tiende a un punto a medida que se va frenando el péndulo.

La evolución temporal de un sistema dinámico puede desarrollarse de manera continua o discreta en el tiempo. En el primer caso, se habla de un flujo; en el segundo, de una aplicación. Un péndulo se mueve continuamente de un estado a otro, y, por ello, se describe por un flujo continuo en el tiempo. El número de insectos que nacen cada año en una cierta región y el intervalo temporal entre gotas sucesivas de un grifo que gotea se explican de modo más natural mediante una aplicación discreta en el tiempo.

Para saber cómo evoluciona un sistema desde un estado inicial dado, se puede recurrir a la dinámica (las ecuaciones del movimiento) que explica el movimiento, por incrementos, a lo largo de la órbita. Para determinar con este método el comportamiento de un sistema, se necesita un trabajo de cálculo que es proporcional al tiempo durante el que se desea seguir la órbita. En el caso de sistemas simples, así un péndulo sin rozamiento, puede ocurrir que las ecuaciones admitan una solución explícita, o sea, una fórmula que exprese cualquier estado futuro en función del inicial. Una solución explícita proporciona un atajo, un algoritmo simple que precisa sólo del estado inicial y el tiempo final para predecir el futuro sin pasar por los estados intermedios. Con tal solución, el trabajo de cálculo necesario para seguir el movimiento es más o menos independiente del tiempo deseado. A modo de ejemplo, dadas las ecuaciones del movimiento planetario y lunar, y las posiciones y velocidades de la Tierra y la Luna, los eclipses pueden predecirse con años de antelación.

Los éxitos en la obtención de soluciones explícitas en el caso de muchos sistemas simples, durante los primeros desarrollos de la física, suscitaron la esperanza de que tales soluciones existieran para cualquier sistema mecánico. Desgraciadamente, sabemos ahora que esto no es así, en general. El comportamiento impredecible de los sistemas dinámicos caóticos no puede expresarse mediante una solución explícita. Consecuentemente, no hay atajos para predecir su comportamiento.

El espacio de configuraciones o estados proporciona, no obstante, una



4. LOS ATRACTORES son formas geométricas que caracterizan el comportamiento a largo plazo en el espacio de configuraciones. A grandes rasgos, un atractor es a lo que tiende, o a lo que es atraído, el comportamiento de un sistema. Se muestran aquí los atractores en azul y los estados iniciales en rojo. Las trayectorias (*verde*) acaban acercándose a los atractores desde los estados iniciales. El tipo más simple de atractor es un punto fijo (*arriba, izquierda*). Tal atractor corresponde a un péndulo con rozamiento; el péndulo llega siempre a la misma posición de reposo, independientemente del modo en que empezó a oscilar (*véase la mitad derecha de la figura 3*). El que le sigue en complejidad es el ciclo límite (*arriba, centro*) que forma un ciclo cerrado en el espacio de configuraciones. Un ciclo límite describe oscilaciones estables, como el movimiento de un reloj de péndulo y el latido del corazón. Las oscilaciones compuestas, o comportamiento cuasiperiódico, corresponden a un toro atractor (*arriba, derecha*). Estos tres atractores son predecibles: su comportamiento puede pronosticarse con exactitud. Los atractores caóticos, en cambio, corresponden a movimientos impredecibles y adquieren una forma geométrica más complicada. En la parte de abajo se muestran tres ejemplos de atractores caóticos; de izquierda a derecha, se ofrecen los descubiertos por Edward N. Lorenz, Otto E. Rössler y uno de los autores (Shaw), respectivamente. Las imágenes se prepararon usando sistemas simples de ecuaciones diferenciales en espacios de fases tridimensionales.

herramienta poderosa para describir el comportamiento de los sistemas caóticos. La utilidad de la imagen que así se obtiene reside en la posibilidad de representar el comportamiento de manera geométrica. Por ejemplo, un péndulo con rozamiento termina por detenerse, lo que significa que la órbita se aproxima a un punto en el espacio de configuraciones. Este punto no se mueve: está fijo; por atraer a las órbitas próximas, recibe el nombre de atractor. Si se da un pequeño empujón al péndulo, vuelve al mismo punto fijo atractor. Cualquier sistema que tiende al reposo con el paso del tiempo puede caracterizarse por un punto fijo en el espacio de configuraciones. Este es el caso de un fenómeno muy general, por el que las pérdidas debidas al rozamiento o a la viscosidad, por ejemplo, provocan que las órbitas sean atraídas hacia una región menor del espacio de configuraciones con menos dimensiones. Se dice que una región así constituye un atractor. *Grosso modo*, un atractor es a lo que tiende, o a lo que es atraído, el comportamiento de un sistema.

Algunos sistemas no tienden al reposo a largo plazo, sino que recorren periódicamente una sucesión de estados. Fijémonos en el reloj de péndulo; en él, la energía perdida por rozamiento se repone con la almacenada en un muelle o un peso. El péndulo repite su movimiento una y otra vez. En el espacio de configuraciones, tal movimiento corresponde a un ciclo, a una órbita periódica. Independientemente de cómo empiece a balancearse el péndulo, el ciclo al que se aproxima a largo plazo es siempre el mismo. Tales atractores son llamados, por ello, ciclos límite. Otro sistema familiar con un ciclo límite es el corazón.

Un sistema puede tener varios atractores. Si así ocurre, diferentes condiciones iniciales pueden llevar a diferentes atractores. El conjunto de puntos que evoluciona hacia un atractor se llama su cuenca de atracción. El reloj de péndulo tiene dos cuencas: los desplazamientos pequeños desde su posición de reposo le devuelven de nuevo al reposo; con desplazamientos grandes, sin embargo, el reloj empieza su tic-tac conforme el péndulo ejecuta una oscilación estable.

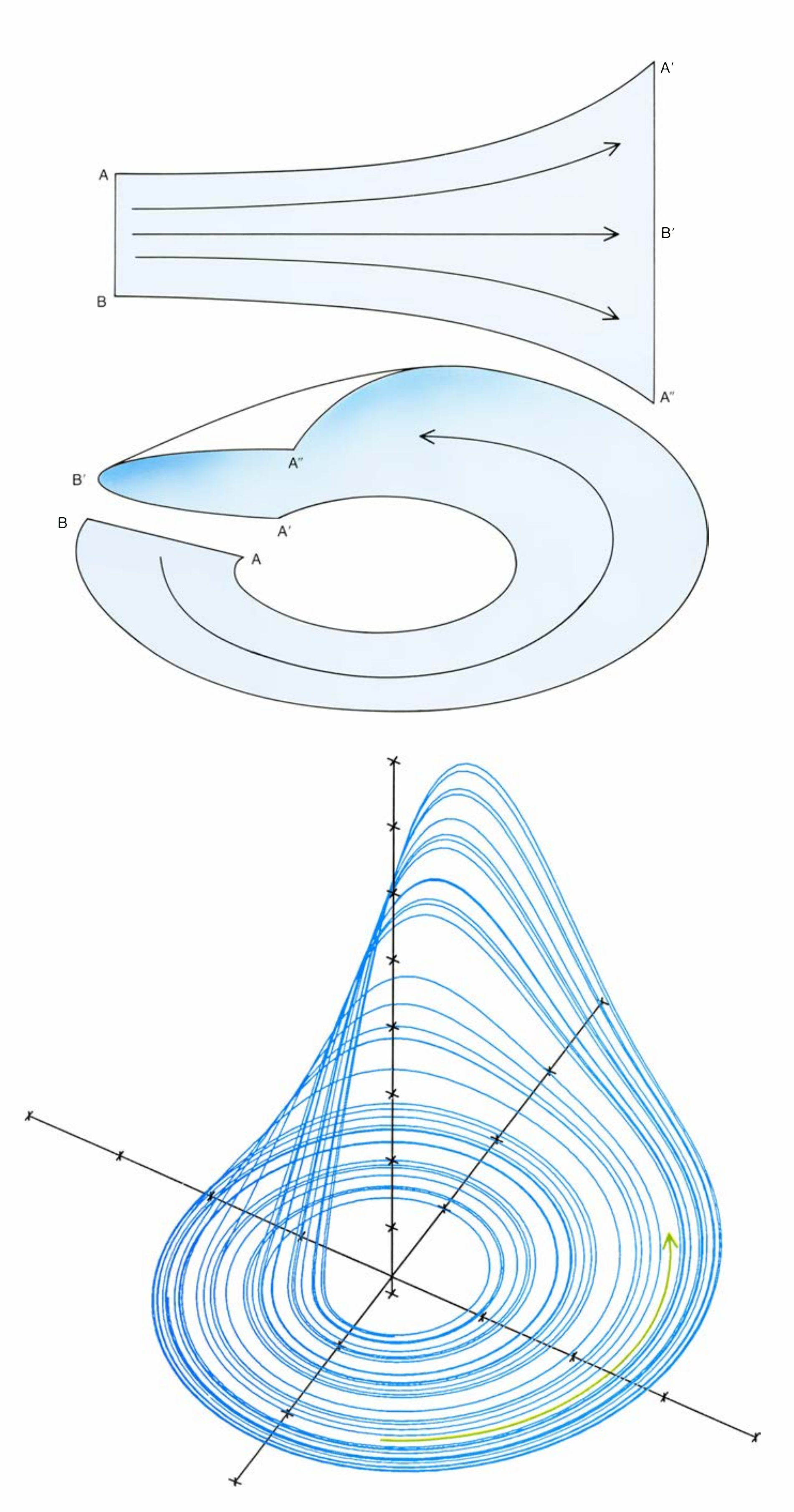
La forma de atractor que sigue en complejidad es un toro, una figura semejante a la superficie de una rosquilla. Describe movimientos que constan de dos oscilaciones independientes, llamados a veces movimientos cuasiperiódicos. (Los osciladores eléctricos son ejemplos físicos.) La órbita se arrolla rodeando el toro en el espacio de las configuraciones, de modo que una frecuencia queda determinada por la rapidez con que la órbita rodea el toro por el camino más corto y la otra por la rapidez con que lo hace alrededor del camino más largo. Los atractores pueden también ser toros de más dimensiones, lo que representa la combinación de más de dos oscilaciones.

Característica importante de los movimientos cuasiperiódicos es la de su impredecibilidad, a pesar de su complejidad. Aun cuando la órbita no se repite nunca exactamente, si las frecuencias carecen de divisor común, el movimiento sigue siendo regular. Las órbitas que empiezan cerca la una de la otra en el toro permanecen siempre cercanas, por lo que la predecibilidad a largo plazo está garantizada.

Hasta hace muy poco, los puntos fijos, los ciclos límite y los toros eran los únicos atractores conocidos. En 1963, Edward N. Lorenz, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, descubrió un ejemplo de un sistema de pocos grados de libertad que presentaba un comportamiento complejo. Motivado por el deseo de entender la impredecibilidad del tiempo meteorológico, empezó con las ecuaciones del movimiento de un flujo fluido (la atmósfera puede considerarse un fluido); simplificándolas, obtuvo un sistema con tan sólo tres grados de libertad. A pesar de ello, el sistema se comportaba de un modo aparentemente estocástico que escapaba a toda caracterización adecuada por cualquiera de los tres tipos de atractor entonces conocidos. El atractor que observó, llamado hoy atractor de Lorenz, fue el primer ejemplo de atractor caótico, o extraño.

Usando un computador digital para simular su sencillo modelo, Lorenz dilucidó el mecanismo básico responsable del azar observado: las perturbaciones microscópicas se amplifican hasta interesar el comportamiento macroscópico. Dos órbitas con condiciones iniciales próximas divergen rápidamente de forma exponencial y por ello permanecen cercanas sólo durante un corto período. La situación difiere cualitativamente en los atractores no caóticos. En ellos, las órbitas vecinas siguen estando cerca, los pequeños errores se mantienen acotados y el comportamiento es predecible.

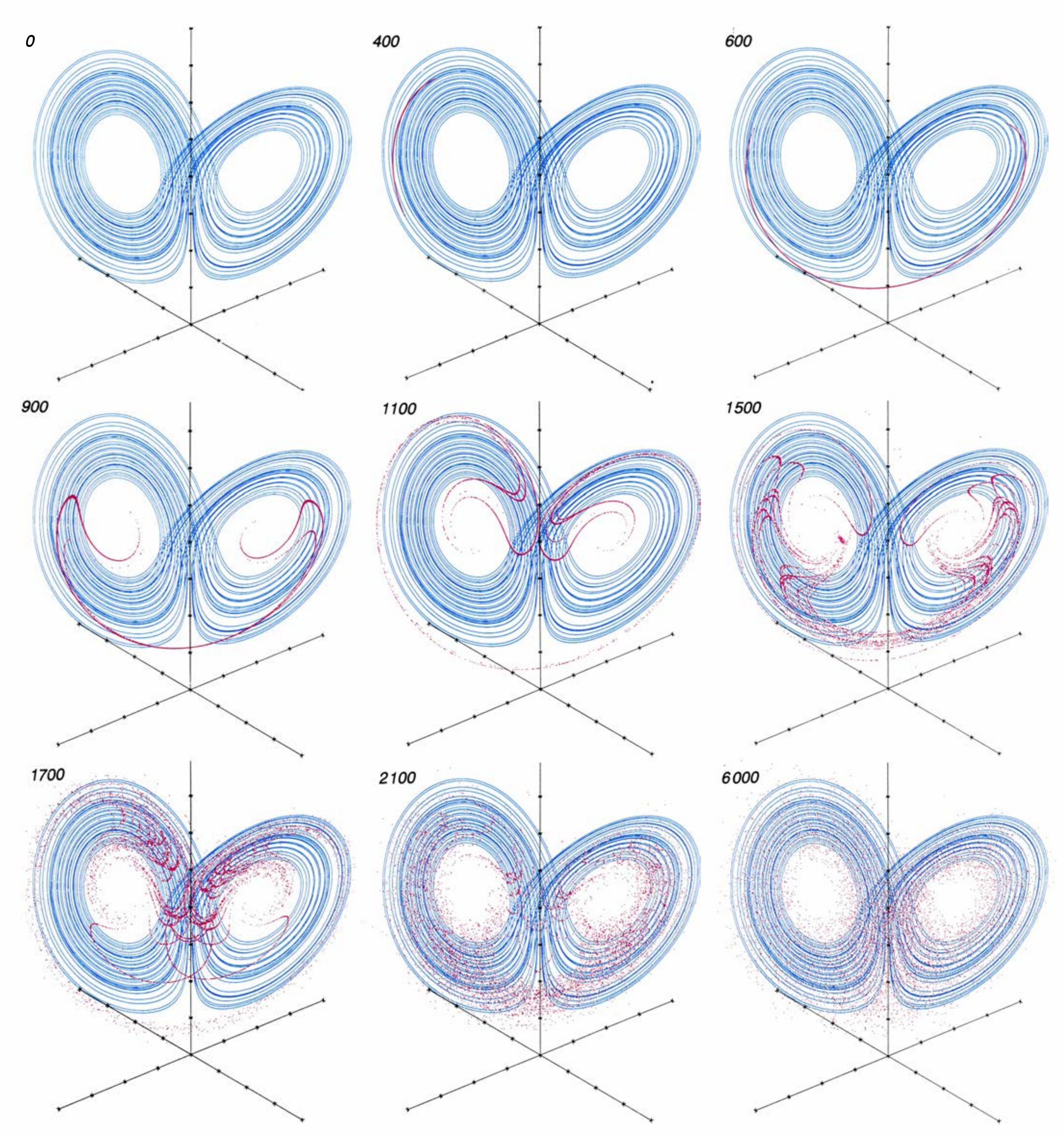
La clave para entender el comportamiento caótico está en una simple operación de estirado y plegado que se produce en el espacio de los estados. La divergencia exponencial constituye una propiedad local: puesto que los atractores tienen tamaño finito, dos órbitas en uno de ellos no pueden diverger exponencialmente de manera indefinida. En consecuencia, el atractor debe plegarse sobre sí mismo. Aunque las órbitas diverjan y sigan caminos cada vez más alejados, en algún momento habrán de acercarse de nuevo entre sí. Al hacerlo, las órbitas se mezclan en un atractor extraño, como nai-



5. UN ATRACTOR CAOTICO desarrolla una estructura mucho más complicada que la que presenta un atractor predecible (un punto, un ciclo límite o un toro). Observado a gran escala, un atractor caótico no constituye una superficie suave, sino una superficie que se pliega sobre sí misma. La ilustración muestra los pasos para construir un atractor caótico del tipo más elemental: el atractor de Rössler (*abajo*). Primero, las trayectorias próximas en el objeto deben "estirarse", o divergir, exponencialmente (*arriba*); aquí las distancias entre las trayectorias se ofrecen dobladas, casi. En segundo lugar, para que el objeto se mantenga compacto, se debe "doblar" sobre sí mismo (*centro*): la superficie se pliega sobre ella, de suerte que sus dos extremos se encuentren. El atractor de Rössler, observado en muchos sistemas, desde flujos de fluidos hasta reacciones químicas, confirma la máxima de Einstein de que la naturaleza prefiere las formas simples.

pes de un mazo cuando un jugador los baraja. El azar de las órbitas caóticas es consecuencia del proceso de mezcla. El proceso de estirar y doblar se produce repetidamente, creando pliegues dentro de los pliegues *ad infinitum*. Un atractor caótico es, en otras palabras, un fractal: un objeto que va revelando nuevos detalles a medida que se va amplificando [*véase la figura 7*].

El caos mezcla entre sí las órbitas en el espacio de configuraciones o estados como el panadero mezcla la pasta del pan cuando la amasa. Para imaginar lo que ocurre con las trayectorias vecinas en un atractor caótico, coloquemos una gota de colorante azul en la masa. El amasado consta de dos acciones: estirar la masa, con la consiguiente extensión del colorante, y plegarla sobre sí misma. Al principio, la gota de colorante sólo se alarga, pero acaba por plegarse sobre sí misma, y con el paso del tiempo se estira y repliega muchas



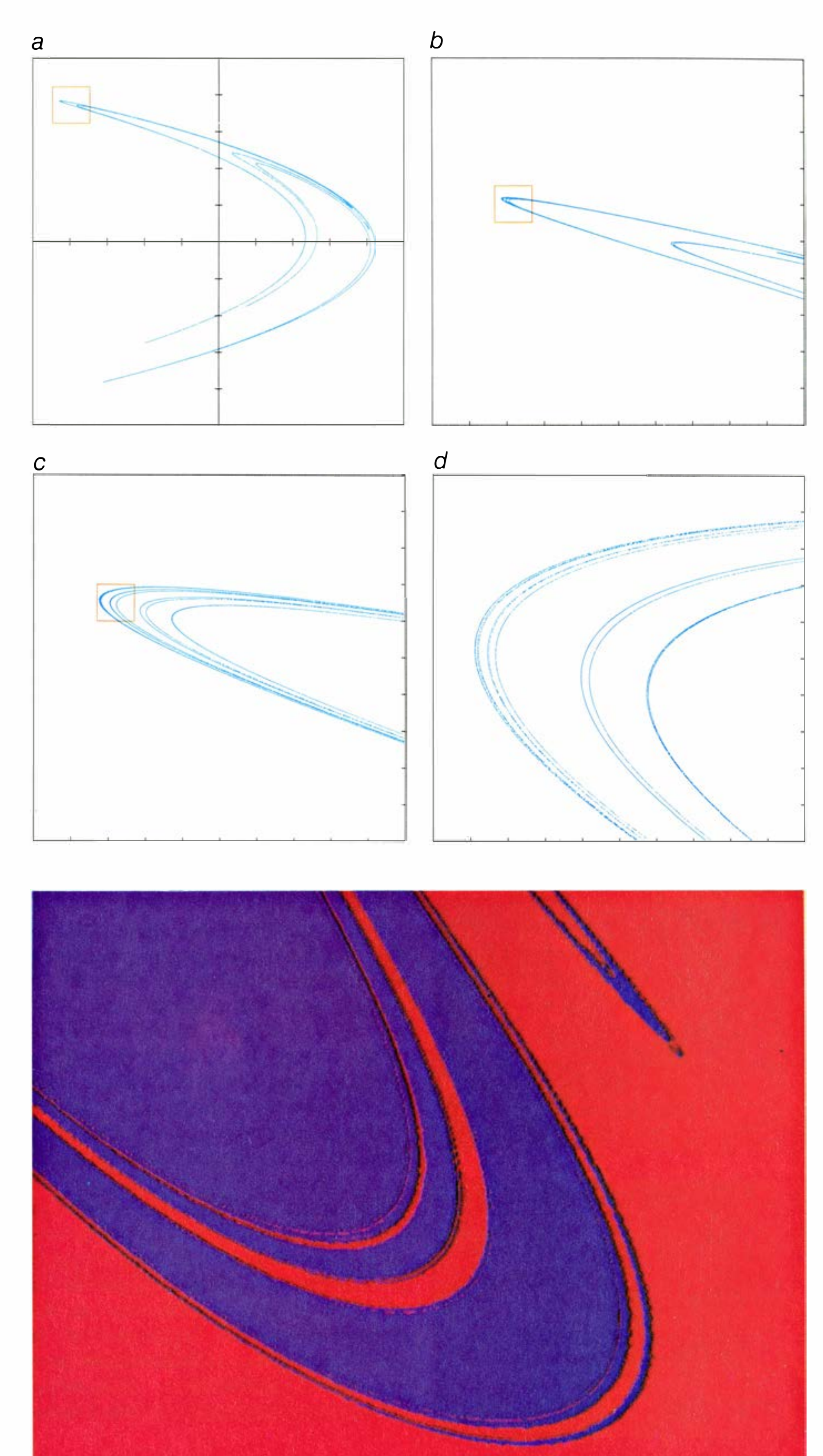
6. DIVERGENCIA de las trayectorias próximas. Constituye la razón última por la que el caos lleva a la impredecibilidad. Una medición perfecta correspondería a un punto en el espacio de configuraciones, pero cualquier medición real resulta imperfecta y genera un entorno de incertidumbre. El verdadero estado podría hallarse en cualquier parte del entorno. Lo que se muestra aquí en el atractor de Lorenz, con la incertidumbre en la medida inicial representada por 10.000 puntos rojos, tan juntos entre sí, en un comienzo, que son indistinguibles. Al moverse cada punto bajo la acción de las ecuaciones, la nube se estira hasta convertirse en un hilo largo y fino, que se pliega después sobre sí mismo muchas veces, hasta que sus puntos se extienden por todo el atractor. La predicción se torna entonces imposible: el estado final puede encontrarse en cualquier parte del atractor. En el caso de un atractor predecible, por el contrario, todos los estados finales permanecen próximos. Los números que hay escritos sobre los esquemas indican el tiempo en unidades de duocentésima de segundo.

veces. Una inspección detallada muestra que la masa consta entonces de muchas capas alternadamente azules y blancas. Tras sólo 20 pasos, la gota inicial se ha estirado hasta más de un millón de veces de su longitud original y su espesor ha disminuido hasta el nivel molecular. El tinte azul se mezcla completamente con la masa. El caos opera del mismo modo, con la diferencia de que, en vez de mezclarse con la masa, se mezcla en el espacio de los estados. Inspirado por esta imagen de la mezcla, Otto E. Rössler, de la Universidad de Tübingen, propuso el ejemplo más elemental de atractor caótico en un flujo [*véase la figura 5*].

Cuando se llevan a cabo observaciones sobre un sistema físico, los inevitables errores de la medición impiden especificar su estado con toda exactitud. Por cuya razón, el estado del sistema no está situado en un punto único, sino en una pequeña región del espacio de configuraciones. Aunque la incertidumbre cuántica fija el tamaño mínimo que puede tener la región, en la práctica diversas clases de ruidos de fondo limitan la exactitud de la medición e introducen errores bastante mayores. La pequeña región especificada por la medida es análoga a la gota de colorante azul en la masa.

Situar el sistema en una región pequeña del espacio de estados o configuraciones mediante una medición proporciona cierta cantidad de información sobre el sistema. Cuanto más precisa sea la medida, más conocimiento obtiene el observador sobre el estado del sistema. A la inversa, cuanto mayor sea la región más incertidumbre tendrá. Puesto que los puntos próximos en un sistema no caótico permanecen cercanos con la evolución temporal, la medición proporciona cierta cantidad de información que se conserva en el tiempo. Este es, precisamente, el sentido en el que tales sistemas pueden denominarse predecibles: las mediciones iniciales contienen información que puede usarse para predecir el comportamiento futuro. En otras palabras, los sistemas predecibles no son especialmente sensibles a los errores de la medición.

Las operaciones de estirado y plegado en un atractor caótico eliminan sistemáticamente la información inicial y la sustituyen por otra nueva; los estirones amplían las incertidumbres en las escalas pequeñas, los pliegues acercan trayectorias que estaban muy separadas y destruyen información de gran escala. Así, los atractores caóticos



7. LOS ATRACTORES CAOTICOS son fractales: objetos que, a medida que se van amplificando, van revelando nuevos detalles. El caos produce fractales de modo natural. Al irse separando las trayectorias próximas, acaban por doblarse una sobre la otra para que el movimiento permanezca dentro de unos límites finitos. Esto se repite una y otra vez, generándose pliegues dentro de los pliegues *ad infinitum*. Como resultado, los atractores caóticos muestran una bella estructura microscópica. Michel Hénon, del Observatorio de Niza, descubrió una regla simple que estira y pliega el plano, cambiando de sitio cada uno de los puntos. Se representan aquí los obtenidos por aplicación reiterada de la regla de Hénon, empezando con un punto inicial. La forma geométrica resultante (*a*) proporciona un ejemplo simple de atractor caótico. El recuadro pequeño se aumenta por un factor 10 en *b*. Repitiendo el proceso (*c*, *d*), la estructura microscópica del atractor se manifiesta en detalle. La ilustración inferior muestra una cuenca de atracción del mapa de Hénon.

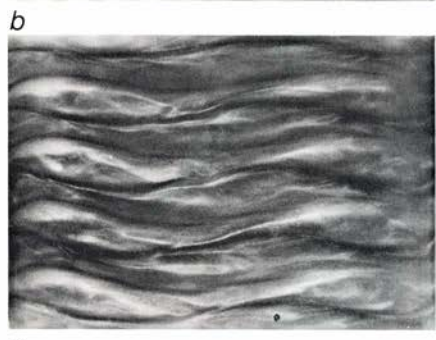
actúan como multiplicadores que elevan las fluctuaciones microscópicas a una expresión macroscópica. Esto explica por qué no existen las soluciones exactas, los atajos para predecir el futuro. Tras un breve período, la incertidumbre incluida en la medición inicial cubre el atractor por entero y se pierde toda capacidad predictiva: simplemente no hay conexión causal entre el pasado y el futuro.

Los atractores caóticos funcionan localmente como amplificadores de ruido. Una fluctuación pequeña, debida quizás a la agitación térmica, causará una gran desviación en la posición de la órbita poco después. Pero hay un aspecto importante en el que los atractores caóticos difieren de los simples amplificadores de ruido. Debido a que las operaciones de estirar y plegar son repetitivas y continuas, cualquier minúscula fluctuación acabará por dominar el movimiento; así, el comportamiento cualitativo es independiente del nivel de ruido. Por ello, los sistemas caóticos no pueden "sosegarse", bajando la temperatura, por ejemplo. Generan azar por sí mismos, sin necesidad de influencias aleatorias externas. Su comportamiento aleatorio se debe a algo más que a la amplificación de los errores y a la pérdida de la capacidad de predecir; se origina por la complejidad de las órbitas generadas por el estirado y el plegado.

Conviene advertir que tanto el comportamiento caótico como el no caótico pueden darse en sistemas sin disipaciones en los que la energía se conserva. En ellos, las órbitas no se relajan hacia un atractor, sino que están confinadas en una superficie de energía. Sin embargo, la disipación es importante en muchos, si no en la mayoría, de los sistemas de mundo real, y cabe esperar que el concepto de atractor sea de utilidad general.

a

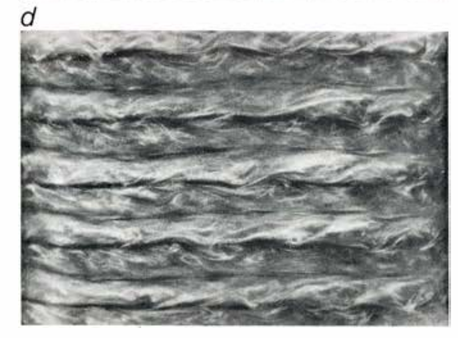
b



c



d



8. COMPROBACION EXPERIMENTAL en apoyo de la hipótesis según la cual los atractores caóticos están en la base de algunas clases de movimiento aleatorio de los fluidos. Se muestran aquí varias fotografías sucesivas del agua en una célula de Couette, que consiste en dos cilindros concéntricos. El espacio entre los dos cilindros se llena con agua y se provoca que el interior gire con una determinada velocidad angular (*a*). A medida que aumenta la velocidad angular, el fluido desarrolla una pauta de comportamiento progresivamente más compleja (*b*) que se torna irregular (*c*) y después caótica (*d*).

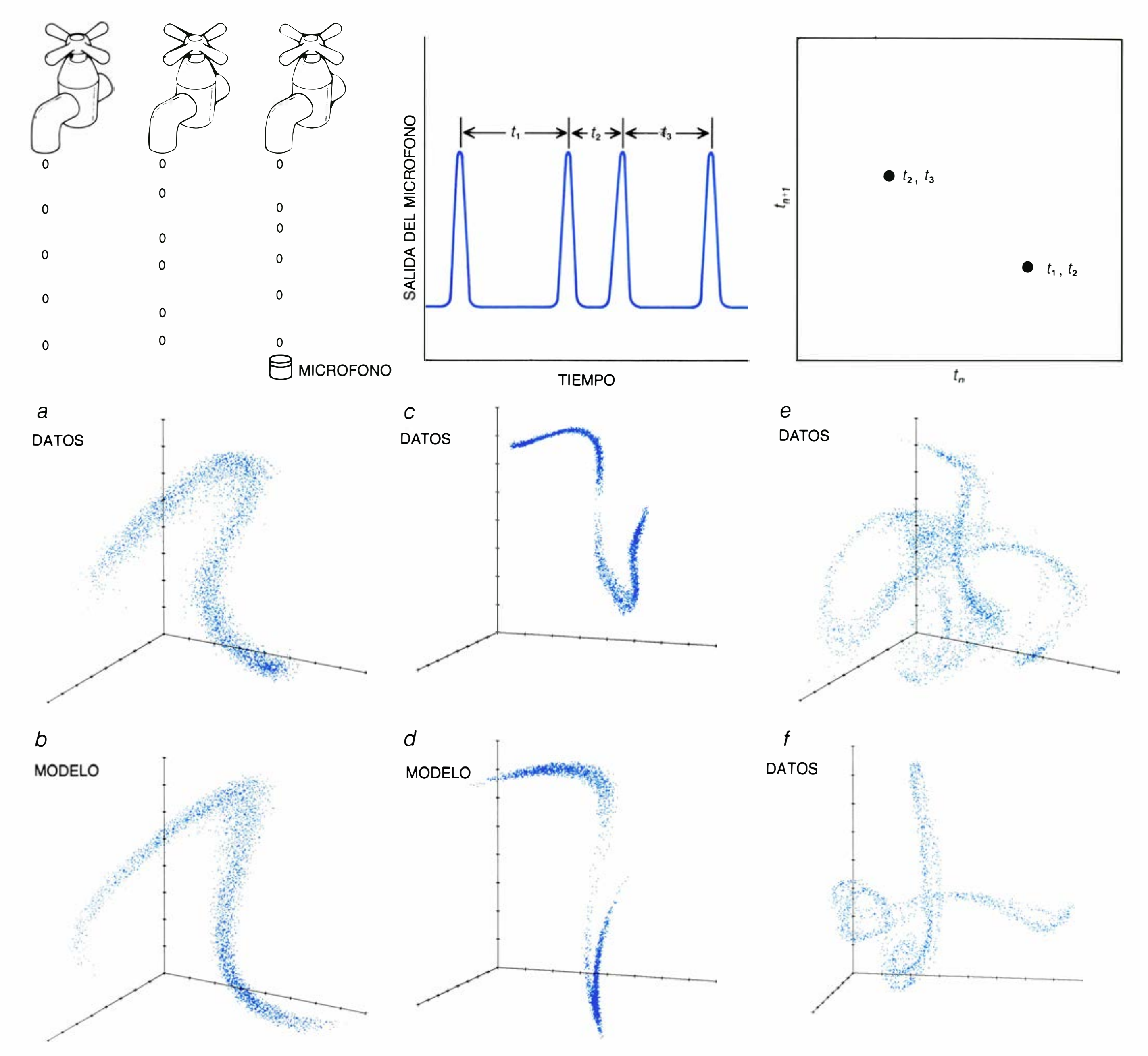
Los atractores caóticos de pocas dimensiones abren un nuevo campo en la teoría de los sistemas dinámicos. Pero debe cuestionarse su relevancia en relación con la aleatoriedad observada en los sistemas físicos. La primera prueba experimental en favor de la hipótesis según la cual los atractores caóticos fundan el movimiento estocástico de los fluidos fue más bien indirecta. El experimento fue realizado, en 1974, por Jerry P. Gollub, del Haverford College, y Harry L. Swinney, de la Universidad de Texas en Austin. La prueba resultó ser indirecta, porque los investigadores no se concentraron en el atractor en sí, sino en las propiedades estadísticas que lo caracterizan.

El sistema que examinaron era una célula de Couette: formada por dos cilindros concéntricos. El espacio entre ellos se llena con un fluido y uno de los cilindros, o ambos, giran con una velocidad angular fija. Según aumenta la velocidad angular, el fluido exhibe pautas de comportamiento progresivamente más complejas, con una dependencia temporal complicada [*véase la figura 8*]. Lo que hicieron Gollub y Swinney fue, esencialmente, medir la velocidad del fluido en un punto dado. Al incrementar la velocidad de rotación, observaron transiciones desde una velocidad constante en el tiempo hasta otra que variaba periódicamente y, finalmente, a otra velocidad variable de forma aperiódica. Esta transición al movimiento aperiódico constituía el punto central del experimento.

El experimento se había diseñado para decidir entre dos concepciones teóricas que predecían diferentes esquemas de comportamiento del fluido a medida que cambiaba la velocidad de rotación. La teoría de Landau del movimiento aleatorio de un fluido predecía que, al incrementar la rotación, se excitaría un número siempre creciente de oscilaciones independientes del fluido. El atractor asociado sería un toro de muchas dimensiones. Esta concepción de Landau había sido puesta en duda por David Ruelle, del Instituto de Altos Estudios Científicos de París, y Floris Takens, de la Universidad holandesa de Groningen. Adujeron argumentos matemáticos de los que se intuía que era poco probable que el atractor asociado con las ideas de Landau apareciera en el movimiento de un fluido. Por el contrario, sus resultados indicaban que cualquier toro de muchas dimensiones debería originar un atractor caótico, como había postulado Lorenz.

Gollub y Swinney encontraron que, para velocidades de rotación bajas, el flujo del fluido no cambiaba con el tiempo: el atractor subyacente era un punto fijo. Al aumentar la velocidad, el agua empezaba a oscilar con una frecuencia independiente que correspondía a un ciclo límite atractor (una órbita periódica), y si la velocidad de rotación se aumentaba aún más, la oscilación presentaba dos frecuencias independientes, lo que indicaba la existencia de un toro bidimensional atractor. La teoría de Landau predecía que, conforme se aumentara la velocidad de rotación, la pauta debería continuar: aparecerían gradualmente más y más frecuencias distintas. Pero no ocurría así. Más allá de una velocidad crítica de rotación, aparecía de repente una banda continua de frecuencias. Esta observación era coherente con el "flujo determinista no periódico" de Lorenz, corroborando la idea de que los atractores caóticos subyacían en la turbulencia de los fluidos.

Aunque el análisis de Gollub y Swinney apoyaba la idea de que los atractores caóticos estaban detrás del mo-



9. EJEMPLO DEL GRIFO QUE GOTEA para poner de manifiesto un sistema común susceptible de experimentar una transición caótica. El atractor subyacente se reconstruye representando los intervalos temporales entre cada par de gotas sucesivas, como se indica en la parte superior de la ilustración. Los atractores reconstruidos con un grifo real (*a, c*) se correlacionan favorablemente con variantes de la regla de Hénon (*b, d*). (El atractor de Hénon completo se muestra en la figura 7.) Las ilustraciones *e* y *f* se reconstruyeron a partir de elevados flujos de agua y revelan, probablemente, secciones de atractores caóticos no conocidos hasta ahora. En las gráficas se emplean intervalos temporales como coordenadas. La horizontal es t_n, intervalo temporal entre la gota *n* y la *n*-1. La vertical es el intervalo temporal siguiente, t_{n+1}, y la tercera coordenada, representada como si saliera de la página, es t_{n+2}. Cada punto corresponde así a un triplete de números (t_n,t_{n+1},t_{n+2}) que se han representado para una muestra de 4094 datos. En las ilustraciones *b* y *d* se añadió un ruido de fondo simulado.

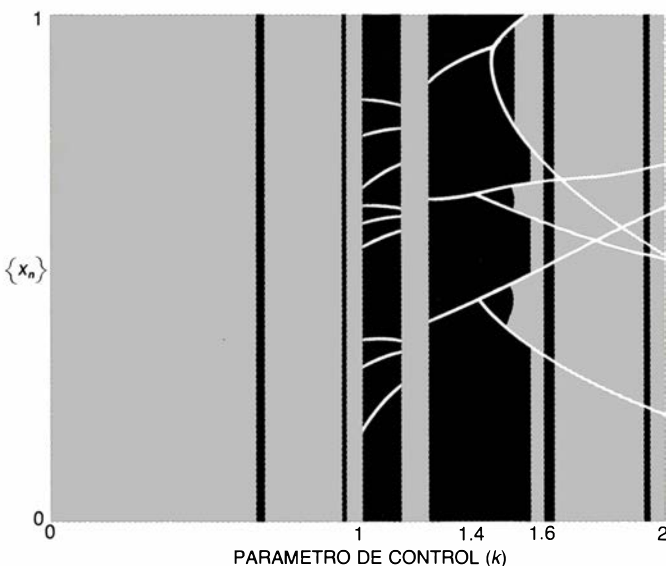
vimiento aleatorio de los fluidos, su trabajo distaba mucho de ser concluyente. Sería deseable demostrar explícitamente la existencia de un atractor caótico simple en los datos experimentales. Sin embargo, lo normal es que en un experimento no se registren todos los aspectos de un sistema, sino tan sólo unos pocos. Gollub y Swinney no podían registrar, por ejemplo, todo el flujo de Couette, sino solamente la velocidad en un punto. Es tarea del investigador "reconstruir" el atractor a partir de unos datos limitados. Está claro que ello no siempre se puede hacer; si el atractor es demasiado complicado, algo se pierde. En algunos casos, sin embargo, sí podemos reconstruir la dinámica a partir de un número reducido de datos.

Una técnica introducida por nosotros y fundamentada matemáticamente por Takens posibilitó la reconstrucción del espacio de configuraciones para buscar atractores caóticos. La idea matriz es que la evolución de cualquier componente singular de un sistema está determinada por los demás con los que interactúa. La información sobre los componentes relevantes está, pues, implícitamente contenida en la historia de cualquier componente singular. Para reconstruir un espacio de configuraciones "equivalente", basta con observar un componente y tratar los valores medidos a intervalos de tiempo fijos (hace un segundo, hace dos segundos, y así en adelante, por ejemplo) como si fueran dimensiones nuevas.

Esos valores retrasados pueden considerarse como nuevas coordenadas que definen un punto en un espacio multidimensional de estados o confi-

guraciones. Repitiendo el procedimiento y tomando valores retrasados en relación con diferentes tiempos, se generan muchos de esos puntos. Se puede hacer uso entonces de otras técnicas para determinar si esos puntos están o no en un atractor caótico. Aunque esta representación es arbitraria desde muchos enfoques, las propiedades importantes de un atractor no se pierden, independientemente de los detalles de la reconstrucción.

El ejemplo con el que vamos a ilustrar esta técnica tiene la ventaja de ser familiar y accesible a todos. La mayoría de la gente conoce la pauta periódica de gotas que caen de un grifo mal cerrado. Puede suceder que el tiempo que transcurre entre gotas sucesivas sea muy regular, lo que ha mantenido despiertos a muchos insomnes esperando la caída de la siguiente gota. Es menos conocido el comportamiento de un grifo cuando el flujo de agua es algo mayor. Suele ser posible encontrar un régimen en el que las gotas, aunque cayendo separadamente, lo hagan sin re-



10. LA TRANSICION AL CAOS, esquematizada mediante un diagrama de bifurcación: una familia de atractores (*eje vertical*) en función de un parámetro de control (*eje horizontal*). El diagrama se generó con un sistema dinámico simple que transforma un número en otro. El sistema dinámico usado aquí se llama una aplicación de circunferencia y se especifica por la ecuación iterativa $x_{n+1} =$ $= w + x_n + k/2\pi \cdot \mathrm{sen}(2\pi x_n)$. Para cada valor del parámetro de control k, un ordenador dibujó el atractor correspondiente. Los colores codifican la probabilidad de encontrar puntos en el atractor: el rojo corresponde a las regiones frecuentemente visitadas; el verde, las que son visitadas con menor frecuencia y, el azul, las que sólo son raramente visitadas. Al incrementarse k desde 0 hasta 2 (*véase el dibujo de la izquierda*), el diagrama muestra dos caminos hacia el caos: una ruta cuasiperiódica (desde $k=0$ hasta $k=1$, que corresponde a la región verde de arriba) y una ruta de "duplicación del período" (desde $k=1,4$ a $k=2$). La ruta cuasiperiódica es matemáticamente equivalente a una órbita que pasa por un toro atractor. En la ruta de la duplicación del período, que se funda en atractores del tipo ciclo límite, las ramas aparecen por pares, siguiendo la serie geométrica 2, 4, 8, 16, 32, etc. Los iterados oscilan entre pares de ramas. (Para un valor concreto de k –1,4, por ejemplo– los iterados visitan sólo tres valores.) A k elevadas, esta "órbita triperiódica" se dobla para visitar seis valores. Luego se cuadriplica hasta doce, y así sucesivamente. Al final, la estructura de ramas se hace tan fina que aparece una estructura continua de bandas: se llega a un umbral tras el cual aparece el caos. (Ilustraciones de James P. Crutchfield.)

petir nunca su cadencia, como una batería que nunca repitiera lo que haya tocado antes. (Es éste un experimento fácil de hacer personalmente; los grifos sin filtro son más adecuados.) Los cambios de la pauta regular a la aparentemente aleatoria recuerdan la transición entre los flujos laminar y turbulento de un fluido. ¿Podría ocurrir que un atractor caótico simple se ocultara tras esta estocasticidad?

El estudio experimental de un grifo que gotea fue realizado en la Universidad de California en Santa Cruz por uno de nosotros (Shaw) en colaboración con Peter L. Scott, Stephen C. Pope y Philip J. Martein. La primera parte del experimento consistía en dejar caer las gotas de un grifo ordinario sobre un micrófono y medir los intervalos temporales entre los pulsos sonoros resultantes. Los resultados típicos de un experimento algo más refinado se muestran en la figura 9. Representando gráficamente pares de intervalos temporales, se obtiene una sección del atractor subyacente. En el régimen periódico, por ejemplo, los meniscos de los que caen las gotas se mueven de una forma suave y repetitiva, que podría representarse mediante un ciclo límite en el espacio de los estados. Pero este movimiento suave es inaccesible en el experimento real; lo único que se registra son los intervalos temporales entre la caída de cada gota. Viene a ser como aplicar una luz estroboscópica a un movimiento cíclico y regular. Si la sincronización es correcta, sólo se ve un punto fijo.

El interés del experimento creció cuando se encontraron atractores caóticos en el régimen no periódico del grifo que gotea. Podría haber ocurrido que la aleatoriedad de las gotas al caer se hubiese debido a influencias inobservadas, tales como pequeñas vibraciones o corrientes de aire. Si fuera así, no habría ninguna relación particular entre un intervalo y el siguiente, de modo que el gráfico de los datos tomados de dos en dos habría mostrado sólo una mancha sin ningún rasgo distintivo. El hecho de que en las gráficas aparezca siempre alguna estructura indica que la estocasticidad se apoya en un andamio determinista. Más concretamente, muchos conjuntos de datos muestran una forma de herradura que es la firma del sencillo proceso de estirado y plegado que expusimos antes. Esta forma característica sería una "instantánea" de un pliegue en progreso, por ejemplo el de una sección que rodee parcialmente el atractor de Rössler que se ve en la figura 5. Otros conjuntos de datos parecen más complicados; podrían ser secciones de atractores de más dimensiones. La geometría de los atractores de más de tres dimensiones es casi completamente desconocida en estos momentos.

Si un sistema es caótico, ¿en qué grado lo es? Una medida del caos es la "entropía" del movimiento, que viene a constituir el promedio del ritmo de estirado y plegado, o bien el promedio de la tasa con que se crea información. Otro dato estadístico es la "dimensión" del atractor. Si un sistema es simple, su comportamiento debería poder describirse mediante un atractor de pocas dimensiones en el espacio de configuraciones, tal como ocurre con los ejemplos citados en este artículo. Pueden ser necesarios varios números para especificar el estado de un sistema más complicado, con lo que el atractor correspondiente debería tener más dimensiones.

La técnica de la reconstrucción, combinada con mediciones de la entropía y de la dimensión, hace posible reconsiderar el flujo de fluido estudiado originalmente por Gollub y Swinney. Así lo hicieron varios miembros del grupo de Swinney, en colaboración con dos de nosotros (Crutchfield y Farmer). La técnica de reconstrucción nos permitió obtener imágenes del atractor subyacente. Imágenes que no demuestran claramente que haya un atractor de pocas dimensiones, como sucede con otros sistemas tales como el grifo que gotea. Sin embargo, las mediciones de la entropía y de la dimensión revelan que el movimiento irregular de un fluido, en el flujo de Couette cerca de la transición, se puede describir con atractores caóticos. Al aumentar la velocidad de rotación en la célula de Couette, lo propio hacen la entropía y la dimensión de los atractores subyacentes.

Se ha demostrado en los últimos años que un número creciente de sistemas exhiben un comportamiento estocástico provocado por un simple atractor caótico. Recordemos, entre ellos, el diagrama de convección de un fluido calentado en una caja pequeña, la oscilación de los niveles de las concentraciones en reacciones químicas inestables, los latidos de las células del corazón de pollo y muchos osciladores eléctricos y mecánicos. Ha aparecido, también, esta simple forma de aleatoriedad en modelos simulados de fenómenos muy diversos, desde epidemias o la actividad eléctrica de una célula nerviosa hasta oscilaciones estelares.

Incluso hay en marcha experimentos para buscar caos en sistemas tan dispares como las ondas cerebrales y la economía.

Importa señalar que la teoría del caos está lejos de constituir una panacea. Cuando hay muchos grados de libertad, los movimientos son complicados y aleatorios. Pero, aun cuando se determine que un sistema es caótico, esto no aclara mucho. Un buen ejemplo es el de las moléculas que rebotan unas contra otras en un gas. Saber que se trata de un sistema caótico no nos facilita la predicción de su comportamiento. Son tantas las partículas que intervienen, que todo lo alcanzable es una descripción estadística, y las propiedades estadísticas esenciales pueden obtenerse sin tener en cuenta el caos.

Hay otras cuestiones en las que se desconoce el papel desempeñado por el caos. ¿Qué ocurre con las pautas espacialmente extensas que cambian sin cesar, como las dunas del Sahara o la turbulencia desenfrenada? No está claro que las pautas espaciales complejas reciban adecuada descripción mediante un único atractor en un espacio de configuraciones. Pero quizá la experiencia con los atractores elementales sirva de guía para una imagen más avanzada, que podría involucrar conjuntos de formas deterministas, espacialmente móviles, similares a los atractores caóticos.

La existencia del caos afecta incluso al mismo método científico. El procedimiento clásico para verificar una teoría consiste en hacer predicciones y contrastarlas con los datos experimentales. Ahora bien, si los fenómenos son caóticos, las predicciones a largo plazo resultan intrínsecamente imposibles. Y esto debe tenerse en cuenta al juzgar los méritos de una teoría. El proceso de su verificación se hace así mucho más delicado, y se debe basar en propiedades estadísticas y geométricas antes que en la predicción.

El caos presenta un nuevo desafío al punto de vista reduccionista, según el cual un sistema puede entenderse descomponiéndolo y estudiando cada parte por separado. Si esta idea ha prevalecido en ciencia es en parte porque hay muchos sistemas en los que el comportamiento del todo es realmente la suma de los comportamientos de sus componentes. El caos demuestra, sin embargo, que un sistema puede tener un comportamiento complicado que emerge en virtud de simples interacciones no lineales entre unos cuantos componentes.

El problema se está agudizando en un amplio campo de disciplinas científicas, desde la descripción de la física microscópica hasta la construcción de modelos del comportamiento macroscópico de organismos biológicos. La capacidad de obtener un conocimiento detallado de la estructura de un sistema ha experimentado un decidido avance en estos últimos años, pero la de integrar ese conocimiento se ha visto frenada por la falta de un marco conceptual apropiado para describir de manera cualitativa el comportamiento. Por ejemplo, ni siquiera con un mapa completo del sistema nervioso de un organismo simple, como el del nemátodo estudiado por Sidney Brenner, de la Universidad de Cambridge, es posible deducir su comportamiento. Análogamente, la esperanza de que la física pueda alcanzar su cumplimiento gracias a un conocimiento cada vez más pormenorizado de las fuerzas y los constituyentes fundamentales es totalmente infundada. La interacción entre los componentes en una escala puede llevar a un comportamiento global muy complejo en otra escala mayor que, en general, no puede deducirse del conocimiento de los componentes individuales.

A menudo se trata el caos en función de las limitaciones que impone, verbigracia, la falta de predecibilidad. Pero la naturaleza puede usar el caos de manera constructiva. A través de la amplificación de pequeñas fluctuaciones puede facilitar a los sistemas naturales el acceso a lo nuevo. Una presa que escapa del ataque de un predador puede usar el control caótico del vuelo como un elemento de sorpresa para evitar su captura. La evolución biológica necesita de la variabilidad genética; el caos proporciona un medio de estructurar los cambios al azar, haciendo así posible que la variabilidad esté bajo el control evolutivo.

El mismo proceso del progreso intelectual se basa en la inyección de nuevas ideas y en nuevos modos de conectar las viejas. Bajo la creatividad innata podría haber un proceso caótico subyacente que amplifica selectivamente pequeñas fluctuaciones y las moldea en estados mentales coherentes y macroscópicos que se experimentan como pensamientos. En algunos casos, los pensamientos pueden ser decisiones o lo que se siente como ejercicio de la voluntad. Desde esta perspectiva, el caos proporciona un mecanismo que permite el libre albedrío en un mundo gobernado por leyes deterministas.

Materia oscura del universo

Hay materia que escapa a nuestra vista. Los movimientos de las estrellas y las galaxias nos indican dónde se encuentra una parte, pero la teoría sugiere que hay mucha más. ¿Qué es y dónde está?

Lawrence M. Krauss

¿De qué está formado el universo? ¿Qué clase de materia es la más abundante? ¿Cuánta hay? ¿Cómo está distribuida? Estas cuestiones, de las que siempre se ocupó la cosmología, se han vuelto a plantear con renovado interés en los últimos años a medida que se han venido acumulando datos a favor de la teoría según la cual la mayor parte de la masa del universo es oscura —invisible para cualquier telescopio o cualquier otro dispositivo observacional existente— y a medida que los avances en física de altas energías y en astrofísica han permitido nuevas predicciones acerca de la composición y distribución de esta forma de materia, posiblemente exótica.

Ya disponemos de pruebas suficientes para afirmar que la materia visible de las galaxias constituye tan sólo el 10 por ciento de la masa galáctica real. El resto, aún no detectable por los observadores terrestres, probablemente está repartida en el interior de cada galaxia y a su alrededor. De acuerdo con ciertas consideraciones teóricas, quizás eso fuera sólo la punta de un "iceberg" cósmico de materia oscura: podría haber cantidades mucho mayores de materia oscura distribuidas por todo el universo, en configuraciones independientes de la repartición de galaxias. Y a lo mejor la explicación de esa masa requiere que existan nuevas formas de materia.

El asunto de la materia oscura —cuánta hay, cómo se distribuye y de qué está formada— guarda una estrecha relación con otras cuestiones concernientes a la estructura global del universo y su evolución. Por ser la materia oscura, probablemente, la forma dominante de la masa del universo, debe haber influido en la evolución de las características que apreciamos hoy. Además, las respuestas a las cuestiones relativas a la estructura dependen, a su vez, de la profunda relación existente entre la macrofísica y la microfísica, los cuerpos de doctrina que describen, respectivamente, las interacciones a gran escala (la del universo en conjunto) y a pequeña escala (la de las partículas elementales que constituyen la materia).

Esta relación resulta de la observación de la expansión del universo. Si pudiéramos remontarnos en la expansión hacia atrás, entre 10.000 y 20.000 millones de años, las escalas cosmológica y microscópica se confundirían, porque en los primeros tiempos las macroestructuras que ahora observamos ocupaban entonces regiones con distancias y energías propias de las escalas típicamente asociadas con los procesos que gobiernan las interacciones de las partículas fundamentales. Como las estructuras remanentes en las mayores escalas observables en la actualidad reflejan las huellas de aquellos procesos, es natural esperar que la resolución del problema de la materia oscura provenga, en parte, de los avances en la física de las partículas de altas energías.

Se han avanzado ya algunas predicciones verificables acerca de la naturaleza de la materia oscura y las estructuras primordiales del universo primitivo. Futuros desarrollos, teóricos y observacionales, ayudarán a decidir en algunas cuestiones, que van desde cómo y cuándo se empezaron a formar las galaxias y las estrellas hasta las clases de simetrías que subyacen en las interacciones de partículas a muy altas energías. En último término, el debate acerca de la materia oscura podría ayudar a resolver una cuestión tan vieja como la curiosidad humana: ¿cuál será el destino del universo?

Desde los primeros años de la década de los 30, cuando Edwin P. Hubble confirmó que el universo estaba en expansión, resulta natural preguntarse si ésta acabará deteniéndose. La respuesta depende de dos factores: con qué rapidez se está expandiendo el universo y cuál es la intensidad con que la fuerza de la gravedad, determinada por la densidad media de masa del universo, mantiene unida la masa. Una densidad de masa elevada provocaría una atracción gravitacional más intensa.

Según la teoría general de la relatividad, existe una relación entre las magnitudes de estos dos factores y la curvatura media del universo [*véase la figura 2*]. Si la densidad media de masa es suficientemente elevada para detener la expansión y provocar que el universo se contraiga de nuevo, se dice que el universo es cerrado. Si la densidad fuera tan pequeña, en comparación con el ritmo de expansión, que el universo continuase expandiéndose a un ritmo finito y por siempre, el universo sería abierto. Si la atracción gravitacional fuera exactamente la necesaria para continuar frenando la expansión sin cerrar el universo, nos hallaríamos en un universo plano.

El universo observable muestra una apreciable uniformidad en todas direcciones. En razón de ello, su ritmo de expansión puede describirse a través de un único parámetro: la llamada constante de Hubble; aunque la verdad es que se trata de una función del tiempo lentamente variable. La constante de Hubble es la velocidad media con que se separan cualquier par de regiones del universo dividida por la distancia entre ellas.

Una vez obtenido el valor de la constante de Hubble, es fácil determinar la densidad de masa que correspondería a un universo plano. Sin embargo, las mediciones de la constante de Hubble dependen, a su vez, de un conjunto de mediciones de las que no tenemos certeza. La constante de Hubble suele determinarse midiendo la velocidad de alejamiento, de la Tierra, mostrada por distintos objetos y calibrando su distancia mediante técnicas tales como estimar su brillo intrínseco y compararlo

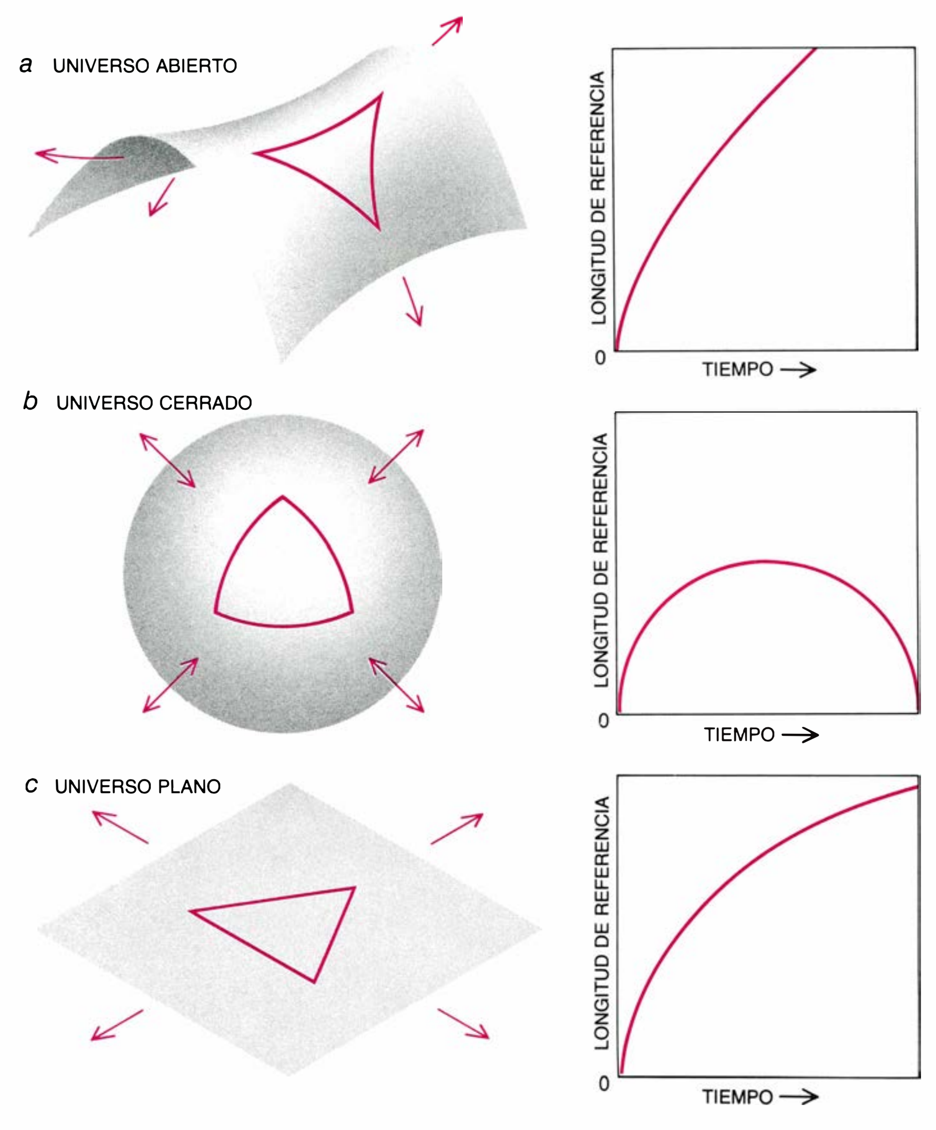


1. LA GALAXIA ESPIRAL M31 (ANDROMEDA) revela la presencia de materia oscura gracias al movimiento de sus brazos exteriores. Estos giran en torno al centro galáctico más deprisa de lo que sería de esperar en la hipótesis de que la materia luminosa visible de la galaxia representara la mayor parte de su masa. Es probable que haya aproximadamente un orden de magnitud más de masa, distribuida en una gran esfera de materia oscura donde esté sumergida la galaxia luminosa. Las mediciones observacionales, combinadas con argumentos tomados de la cosmología, sugieren que la masa asociada a las galaxias, incluida la masa de la materia oscura en la que se hallan sumergidas, proporcionaría tan sólo una quinta parte aproximadamente de la densidad de masa total del universo. El resto podría hallarse asociado con materia oscura (constituida quizá por nuevas clases exóticas de materia), distribuida por otras regiones.

con el brillo que vemos desde nuestro planeta.

Pero se trata de unas mediciones de escasa fiabilidad, por cuya razón hay una dispersión de un factor de dos, aproximadamente, en las actuales determinaciones del ritmo de expansión del universo. En el límite superior, los objetos distantes un megaparsec entre sí (unos 3,26 millones de años luz) están separándose uno del otro a una velocidad algo inferior a los 100 kilómetros por segundo, en promedio. A este ritmo, la densidad de masa media que daría un universo plano es de unos 2×10^{-29} gramos por centímetro cúbico, lo que viene a equivaler a la masa de 10 átomos de hidrógeno por metro cúbico de espacio.

¿Cómo determinar cuánta masa existe en realidad? Un método que al menos permite calcular una cota inferior se limita a sumar la cantidad total de materia visible. Ahora bien, lo que puede medirse directamente no es la masa, sino la luminosidad; es necesario, pues, introducir algún mecanismo interpretador que transforme las observaciones en densidades de masa. Cuando a la distribución y luminosidad observadas de los objetos estelares y el gas difuso se aplican las estimaciones teóricas de sus masas, todo indica que la razón masa-luminosidad de la materia luminosa asociada a las galaxias es unas cuantas veces mayor que la razón masa-luminosidad del Sol. Con esta estimación, y teniendo en cuenta los límites inferiores estimados de la constante de Hubble, resulta que la densidad media de materia luminosa del universo no llega al 2 por ciento de la que sería necesaria para detener la expansión.



2. CURVATURA DEL UNIVERSO: depende de la velocidad media de expansión del mismo y de la densidad media de la materia que contiene. Si el ritmo de expansión es alto en relación con la cantidad de masa, se dice que el universo es abierto. Una geometría espacial tridimensional así es análoga a una determinada geometría bidimensional: la superficie próxima al centro de una silla de montar (*a, izquierda*). La forma del espacio condiciona la forma de los objetos geométricos. Por ejemplo, en un universo abierto la suma de los ángulos de un triángulo sería menor que 180 grados, igual que sucede sobre la superficie de una silla de montar. El efecto no sería apreciable para distancias tan pequeñas como las que somos capaces de medir en la Tierra, de igual manera que un triángulo de una zona muy exigua de una silla de montar parecería normal. Si el universo es abierto, continuará expandiéndose por siempre a un ritmo finito: cualquier longitud de referencia (la distancia entre cualquier par de regiones del universo en expansión) continuará aumentando (*a, derecha*). Si la cantidad de masa del universo es alta en relación a su ritmo de expansión, el universo es cerrado. Se cierra sobre sí mismo, a imagen de la superficie de una esfera que se cierra sobre sí misma (*b, izquierda*). Sobre una esfera, los ángulos de un triángulo suman más de 180 grados. Si el universo es cerrado, acabará por cesar en su expansión y se contraerá de nuevo (*b, derecha*). Si el ritmo de recesión y la cantidad de masa del universo se ajustan exactamente, el universo será plano y análogo a una superficie plana (*c, izquierda*). Continuará expandiéndose, pero el ritmo de expansión disminuirá asintóticamente (*c, derecha*). Sólidos argumentos teóricos apoyan la hipótesis de un universo plano, incluso a pesar de que, para serlo, debería contener una masa mucho mayor que la observada hasta ahora, directa o indirectamente.

Pero desde 1933 se sabía ya que los cúmulos de galaxias contendrían una proporción apreciable de masa no luminosa. Ese mismo año, Fritz Zwicky, del Instituto de Tecnología de California, mientras analizaba las velocidades de las distintas galaxias del cúmulo de Coma, descubrió que muchas de ellas se movían con tal celeridad que el cúmulo, considerado en conjunto, acabaría por disgregarse a menos que hubiera más masa, amén de la luminosa, que lo mantuviera unido. La estabilidad del cúmulo venía apoyada por otros datos; y Zwicky concluyó que el cúmulo debía contener materia no luminosa.

Zwicky sentó un importante precedente al mostrar que, en principio, la materia oscura podía detectarse indirectamente a través de sus efectos gravitacionales. Recientemente, otros investigadores han demostrado de manera convincente que, con técnicas similares, se detecta la presencia de materia oscura en estructuras cuyas escalas van desde el entorno inmediato del sistema solar hasta los supercúmulos que engloban miles de galaxias, pasando por las galaxias y los cúmulos galácticos.

El estudio mejor documentado sobre la presencia de materia oscura se obtuvo a partir de las velocidades de rotación de las galaxias espirales [véase "Materia oscura en galaxias espirales", por Vera C. Rubin; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1983]. La velocidad de rotación de un objeto perteneciente a un sistema estable ligado gravitacionalmente, piénsese en una galaxia espiral, depende, en parte, de su distancia al centro de rotación. Según las leyes de Newton, la velocidad orbital de

los objetos alejados de una concentración central de masa decrece de manera inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su distancia al centro de rotación. Mediante exploraciones sistemáticas de estrellas y gases calientes de las regiones exteriores de galaxias espirales, varios grupos de investigadores han demostrado que dichos objetos poseen velocidades rotacionales constantes, sin decrecer, hasta más allá de 30 kiloparsecs del núcleo galáctico. Jeremiah P. Ostriker y P. James E. Peebles, de la Universidad de Princeton, ya habían sugerido que en las galaxias espirales debía haber más masa de la que vemos, pues de otro modo las inestabilidades gravitacionales provocarían el colapso de las galaxias en estructuras con forma de barra. La estabilidad de las galaxias espirales, así como las velocidades de rotación de sus brazos exteriores, tendrían justificación si cada galaxia estuviera rodeada, más o menos circularmente, por grandes cantidades de materia oscura.

Hay otra prueba de carácter dinámico en favor de la materia oscura, en escalas mayores y menores que la de las galaxias individuales. Esta prueba no se obtiene a partir de mediciones de velocidades rotacionales, sino calibrando las velocidades individuales aleatorias de objetos pertenecientes a sistemas gravitacionalmente ligados. Un teorema bien conocido de la mecánica clásica, el llamado teorema del virial, establece una relación entre la energía cinética media y la energía potencial gravitatoria de los objetos de los sistemas estables ligados gravitacionalmente que hayan alcanzado el equilibrio dinámico. Debe ser posible, por tanto, estimar la masa total de un sistema de estas características (ya que está relacionada con su energía potencial gravitatoria total) midiendo las velocidades relativas de un gran número de parejas de objetos pertenecientes al sistema. Con este método se obtiene una prueba de la existencia de materia oscura en un amplio conjunto de sistemas, que van desde galaxias esferoidales enanas de sólo 10^7 masas solares hasta enormes cúmulos galácticos de 10^{15} masas solares. Con las regiones de mayor tamaño analizadas de esta manera (un entorno de las galaxias de aproximadamente un megaparsec), las densidades de masa medias que se obtienen no pasan del 20 por ciento aproximadamente de la densidad necesaria para cerrar el universo.

Otro método, avanzado por Peebles y sus colaboradores, se basa en un análisis estadístico de un gran número de galaxias, más que en los datos tomados de galaxias o cúmulos individuales. Peebles demostró que, partiendo de múltiples datos estadísticos sobre acumulación y movimientos de galaxias en distintas escalas de tamaños, era posible —suponiendo que las regiones analizadas encerraran sistemas dinámicos gravitacionalmente estables— relacionar la velocidad media relativa de un gran número de parejas de galaxias con la densidad de masa media del universo.

Es sorprendente que todos los métodos disponibles, abordados o no aquí, conducen al mismo resultado: si la distribución de galaxias sigue la distribución de masa del universo, entonces éste tiene menos de un 20 o 30 por ciento de la densidad de masa media que sería necesaria para cerrarlo.

Aun cuando las galaxias no fueran indicadores fiables de la presencia de masa, o todos los análisis adolecieran de errores sistemáticos, seguiríamos contando con buenas razones para creer que, a pesar de todo, la cantidad total de masa ordinaria (la masa que se encuentra principalmente en protones y neutrones) que hay en el universo no representa más que el 20 por ciento de la cantidad exigida para cerrarlo. Esa seguridad se apoya, sobre todo, en el marco teórico que explica el proceso de la nucleosíntesis, por el que se formaron los primeros elementos e isótopos ligeros que abundan en el cosmos.

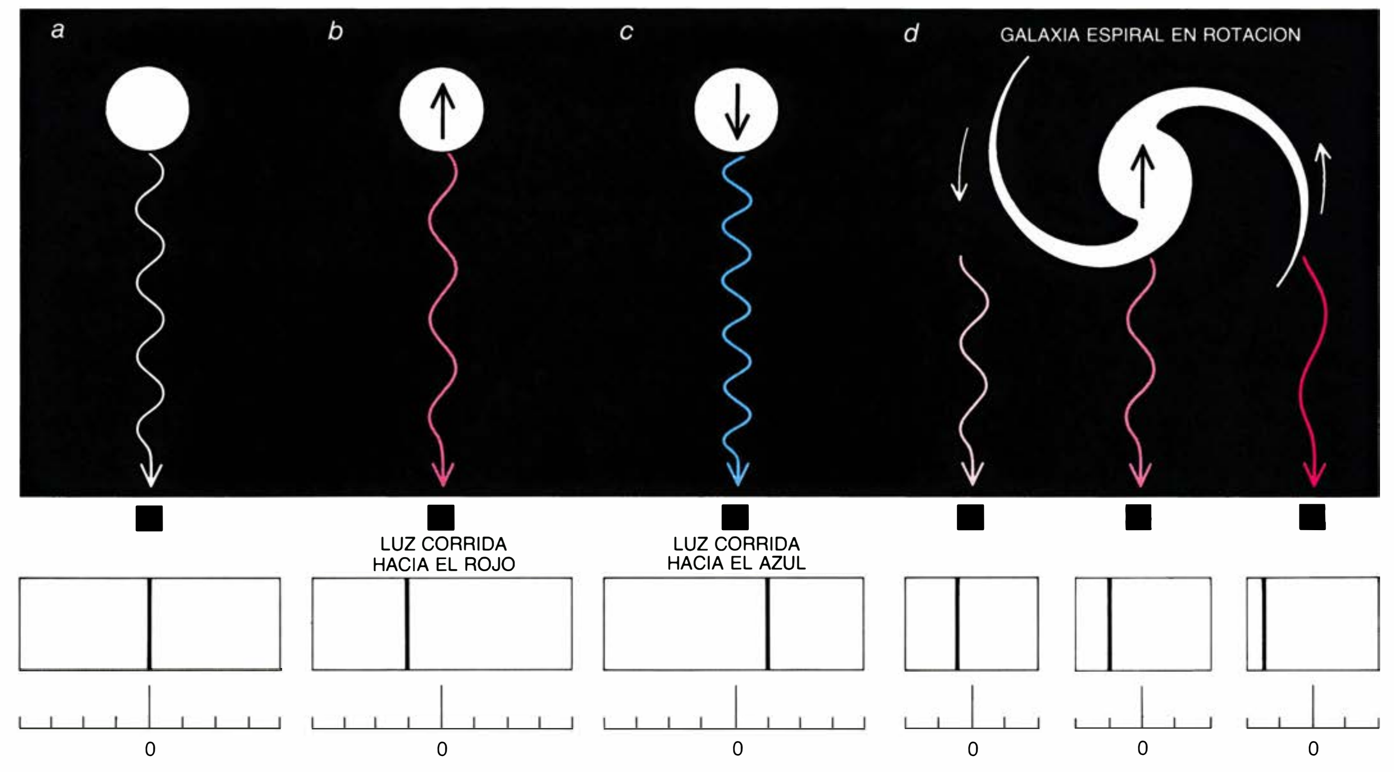
La nucleosíntesis de elementos ligeros tuvo lugar principalmente en los primerísimos minutos de existencia del universo. El proceso de la nucleosíntesis habría sido extremadamente sensible a la densidad absoluta de protones y neutrones existentes entonces. A fin de que las predicciones de los modelos teóricos actuales de la nucleosíntesis concuerden con las abundancias de elementos ligeros del presente, la densidad total de protones y neutrones que pudiera haber en la época de la nucleosíntesis queda tan restringida que la densidad actual de estas partículas debe ser inferior al 20 por ciento aproximadamente de la densidad necesaria para cerrar el universo. Podemos concluir que, si el universo es cerrado, al menos el 80 por ciento de su masa total corresponde a otra clase de materia.

Como tales argumentos de fondo limitan la cantidad de masa normal en el universo al 20 por ciento de la densidad crítica, y siendo que los datos observacionales sugieren que la densidad de masa asociada a las galaxias y a los cúmulos de galaxias viene a coincidir con esa cifra, ¿no tendrían que admitir los cosmólogos un universo abierto? No es en absoluto imposible imaginar que una cantidad de materia normal capaz de explicar la dinámica de las galaxias y los cúmulos pueda permanecer invisible. ¿Por qué entonces es necesario postular la existencia de cualquier otra forma de masa? ¿Por qué tiene que constituir un problema la materia oscura?

Dos obstáculos teóricos se oponen a la simple hipótesis de que la mayor parte, si no toda, la masa del universo esté formada por materia normal y que la densidad media sea sólo el 20 por ciento de la crítica. El primer obstáculo lo presenta la conjunción de la teoría de la formación de galaxias con observaciones de la radiación de fondo de microondas que inunda el cosmos.

Se acepta que la formación de las galaxias debióse a la condensación de regiones del universo primitivo con una densidad superior a la media, agregación inducida por la fuerza de la gravedad, y su separación de la expansión general para constituir sistemas ligados y aislados. Hasta pasados unos 100.000 años después de la gran explosión, la materia ordinaria no podía someterse a ese proceso de condensación. La materia ordinaria estaba todavía demasiado caliente como para que sus partículas integrantes se hubieran combinado en átomos eléctricamente neutros; constaba, pues, de partículas cargadas independientes. Por hallarse la materia ordinaria así ionizada, su movimiento microscópico quedaba fuertemente influenciado por campos de radiación electromagnética de fondo: la materia y la radiación estaban acopladas. Las regiones de materia ordinaria que eran más densas que las regiones circundantes y menores que el tamaño del horizonte (la distancia que un rayo de luz podía haber recorrido desde la gran explosión, y por tanto la distancia máxima en la que los sistemas físicos podían estar en contacto causal) no podrían haberse condensado más, debido a que la "presión" de la radiación contrarrestaba la fuerza atractiva de la gravedad, superándola.

El universo terminó por enfriarse hasta permitir que se combinaran las partículas de cargas opuestas, dando lugar a materia normal eléctricamente neutra; la materia se desacopló de la radiación. Desde entonces, el baño de



3. GRACIAS AL CORRIMIENTO DOPPLER de la frecuencia nos es dado establecer con qué rapidez un objeto emisor de luz se acerca o se aleja del observador, así como la velocidad de giro de los brazos espirales de una galaxia. Un objeto estelar emite luz en frecuencias características y determinadas por su composición (*a*). Si el objeto se mueve alejándose del observador (*b*), la longitud de onda de la luz observada aparece aumentada. Este fenómeno recibe el nombre de corrimiento hacia el rojo, debido a que la luz de longitud de onda mayor es más rojiza. Si el objeto avanza hacia el observador (*c*), la longitud de onda se acorta; la luz está desplazada hacia el azul. Las galaxias espirales tienden a alejarse de la Tierra en virtud de la expansión del universo. Así que, para un observador, la luz procedente del centro de una galaxia espiral aparece corrida hacia el rojo (*d, centro*). Un brazo de la galaxia en rotación (*d, izquierda*) no se estará alejando de la Tierra con la rapidez que lo hace el centro de la galaxia; su luz estará, pues, menos desplazada hacia el rojo. El otro brazo se alejará más deprisa de la Tierra que el centro de la galaxia (*d, derecha*); su luz se hallará más corrida hacia el rojo. Comparando los desplazamientos hacia el rojo del centro y de los brazos, se determina la velocidad de rotación de cualquier parte de ambos brazos. Ello nos permite deducir la distribución de masa de la galaxia.

radiación de fondo térmica al que la materia había estado acoplada se fue enfriando libremente a medida que el universo se expandía, y constituye actualmente la conocida radiación cósmica de fondo de la zona de microondas que llena el universo. Las observaciones han puesto de manifiesto que esta radiación de fondo es isotrópica —la misma en todas las direcciones— dentro de un grado de aproximación muy elevado.

Por ser la gravedad una fuerza atractiva universal, cualquier fluctuación inicial, cualquier pequeña variación de la densidad de materia ordinaria en el universo primitivo habría tendido a crecer después de que la fuerza de la presión de radiación ya no actuara oponiéndose a la fuerza de la gravedad. Se supone que fue así como el universo se llenó (y está llenándose) de agregados de materia y que las galaxias, cuyos núcleos tienen ahora densidades un millón de veces más elevadas que la densidad media de fondo, surgieron a partir de fluctuaciones cuyas densidades no diferían tanto del valor de fondo.

¿De qué magnitud eran las fluctuaciones iniciales? A causa de la limitación de los datos disponibles acerca de las estructuras de gran tamaño, y debido también a las dificultades matemáticas inherentes a la descripción analítica de la evolución de sistemas densos como las galaxias, resulta extremadamente difícil retroceder desde el estado actual del universo para determinar la naturaleza exacta de las fluctuaciones primigenias. Una aproximación más sencilla consiste en adoptar algún esquema inicial de fluctuaciones, simular el crecimiento y evolución partiendo de dicho esquema y comparar el resultado con las observaciones actuales. En este enfoque, el cosmólogo se guía por el límite inferior y superior del tamaño y la naturaleza de las fluctuaciones iniciales. En primer lugar, las fluctuaciones tuvieron que adquirir tal intensidad, en las escalas correspondientes a los tamaños galácticos (es decir, que la razón entre el exceso de densidad local en la región de la fluctuación y la densidad media del espacio debió ser suficientemente grande), que permitieran activar la condensación que condujo a la formación de las galaxias observadas hoy. En segundo lugar, las fluctuaciones debieron ser de amplitud lo bastante restringida para que no dejaran ninguna anisotropía en la radiación de fondo mayor que el límite superior medido.

Dos condiciones que se dirían mutuamente antagónicas si el universo constara, en su mayor parte, de materia normal. Entre el instante en el que la materia normal se desacopló de la radiación y el instante en el que las fluctuaciones que se convertirían en galaxias se colapsaron para formar sistemas aislados y ligados gravitacionalmente, las pequeñas fluctuaciones iniciales de densidad sólo pudieron crecer a un ritmo definido. Las fluctuaciones suficientemente grandes como para haber llegado a formar en ese tiempo sistemas autoligados habrían producido una anisotropía en la radiación de fondo por encima de un orden de magnitud mayor que los límites superiores observacionales. En otras palabras, no ha habido tiempo suficiente, desde el desacoplamiento, para que las galaxias surgieran gravitacionalmente a partir de fluctuaciones cuya menguada densidad no habría dejado señales observables en la radiación de fondo.

Esta conclusión descansa sobre dos hipótesis ampliamente aceptadas: que la radiación de fondo de microondas no ha sufrido perturbaciones significativas desde el instante de desacoplamiento y que sólo la gravedad instó la formación de las galaxias. A menos que alguna de estas hipótesis sea falsa (cosa que varios investigadores han sugerido), parece obligada la existencia de alguna nueva forma de materia que pudiera haber empezado a condensarse gravitacionalmente antes de que pudiera hacerlo la materia ordinaria.

Hay una segunda razón, de mayor peso, para suponer que el universo no esté dominado por materia normal con una densidad de sólo un 20 por ciento de la crítica. Este motivo, conocido por problema de la planaridad ("flatness problem"), lo adujeron R. H. Dicke, de Princeton, y Peebles. Viene a decir que cualquier desviación de un universo plano debería tender a aumentar linealmente con el tiempo. Bastaría que el universo hubiera tenido una pequeña curvatura no nula, en el instante de la nucleosíntesis, para que la desviación de la planaridad hubiera aumentado hasta nuestros días en un factor aproximado de 10^{12}. Por hallarse la densidad de masa del universo actual dentro de un factor 10 de la densidad de masa de un universo cerrado (en otras palabras, el universo está relativamente cerca de ser plano), en la nucleosíntesis el universo debería haber sido exactamente plano o curvado en un grado pequeñísimo: debería haber sido plano en un valor de aproximación de una parte en un billón.

Si el universo presenta hoy una curvatura mensurable, los cosmólogos habrán de aceptar el hecho milagroso de que la tiene por primera vez en sus 10^{10} años de historia. Si en otro instante anterior hubiera gozado de un carácter alejado de la planaridad, su presunta curvatura actual sería mucho más fácil de detectar. De acuerdo con esta línea de razonamiento, el universo observable es, en esencia, exactamente plano: posee la densidad de masa crítica. Como la materia ordinaria sólo da cuenta, probablemente, del 20 o 30 por ciento de la densidad crítica, cabe presumir que exista otra forma de materia, más exótica.

En pura lógica, la siguiente cuestión a resolver será: ¿por qué el universo es exactamente plano? En 1980, Alan H. Guth, hoy en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, avanzó una respuesta. Se trataba de un modelo de evolución del universo primitivo basado en ideas de la física de partículas que se acababan de proponer.

Guth se inspiró en el trabajo de Howard Georgi y Sheldon Lee Glashow, de la Universidad de Harvard. En 1974, estos últimos defendieron que tres de las fuerzas fundamentales de la naturaleza —fuerte, débil y electromagnética— eran aspectos diferentes de una sola fuerza "unificada". A energías suficientemente altas, las tres deberían ser exactamente simétricas: debían comportarse igual. A energías comparables a las observables actualmente en la Tierra, por otro lado, las tres se comportan de manera muy distinta [véase "Teoría unificada de las partículas elementales y de las fuerzas", por Howard Georgi; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1981]. La temperatura del universo primitivo, justo después de la gran explosión, fue en un comienzo lo suficientemente elevada para mantener la simetría de las tres fuerzas. Cuando el universo se enfrió por debajo de la energía crítica en la que pueden mantenerse las simetrías que relacionan las tres fuerzas, adquirió una configuración de simetría "rota". Esta rotura de simetría produjo la diversificación de las fuerzas.

(Tenemos un sencillo ejemplo de este tipo de comportamiento en los ferroimanes. A temperaturas altas, un trozo de hierro no queda imanado: los espines de los electrones, cada uno de los cuales provoca un pequeño campo magnético, apuntan en direcciones orientadas al azar. Sin embargo, por debajo de cierta temperatura crítica, puede resultar más favorable, hablando en términos de energía, que todos los espines apunten en una misma dirección, alineando sus campos magnéticos y creando un imán permanente. La dirección del campo magnético en el imán se polariza, y así la simetría de la configuración anterior, en la que no había ninguna dirección privilegiada, se rompe.)

Según la idea de Guth, que ampliaron después Andrei D. Linde, del Instituto de Física P. N. Lebedev de Moscú, y Paul J. Steinhardt y Andreas Albrecht, de la Universidad de Pennsylvania, la brusca ruptura de la simetría pudo provocar que el universo se "inflara" rápidamente: el universo pudo haberse expandido exponencialmente, creciendo en más de 28 órdenes de magnitud en menos de 10^{-30} segundos. Después del período de rápida inflación, el universo pudo haber vuelto a su expansión normal (no exponencial) que se observa actualmente [véase "El universo inflacionario", por Alan H. Guth y Paul J. Steinhardt; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1984].

Según este modelo, la rápida inflación del universo provocó que las regiones observables del espacio se aplanaran, de manera similar a lo que pasa al hinchar un globo: produce la impresión de que su superficie sea más plana; después de la inflación, la parte del universo que observamos ahora aparece necesariamente plana.

Además de resolver el problema de la planaridad, la imagen del universo inflacionario presenta otras ventajas. En particular, es el único modelo que relaciona de manera coherente las condiciones iniciales que provocaron la expansión del universo con las leyes de la microfísica. El modelo de universo inflacionario permite también calcular, a partir de primeros principios, cantidades cuyos valores habían sido hasta entonces supuestos sin más, o propuestos de manera aproximada. Por ejemplo, el modelo predice entre otras cosas que la forma del espectro de las fluctuaciones de densidad primordiales (la relación funcional entre la amplitud de las fluctuaciones y su escala de tamaños) tiene la forma precisa que se había sugerido antes a partir de datos fenomenológicos. La amplia aceptación que merecen a muchos cosmólogos las predicciones del modelo de universo inflacionario indica la profunda incidencia que la teoría de partículas está teniendo en la cosmología moderna.

Al resolver el problema de la planaridad, el modelo inflacionario hace más acuciante el problema de la materia oscura. Si el universo es plano, es probable que la mayor parte de su masa no sea de materia ordinaria y que la principal fracción de la misma esté todavía por detectarse, aunque fuera de manera indirecta.

¿De qué puede estar formada esta materia exótica aún no detectada? Una de las primeras propuestas avanzó la hipótesis de que fuera de neutrinos. Estas partículas, cuya existencia se postuló inicialmente para resolver problemas relacionados con la conservación de la energía y el momento en las desintegraciones nucleares, interaccionan muy débilmente con la materia ordinaria, lo que dificulta en extremo su detección. A pesar de ello se han encontrado experimentalmente tres clases de neutrinos: electrónico, muónico y tauónico. Se afirmó en un

comienzo que los neutrinos carecían de masa, pero ninguna razón teórica prohíbe que la posean. Ello no obstante, se ha restringido, desde el punto de vista experimental, el máximo de masa que los neutrinos puedan tener, y los límites en que se ha acotado son realmente muy pequeños. La restricción más fuerte pesa sobre el neutrino electrónico, cuya masa debería ser inferior a la diezmilésima de la masa del electrón.

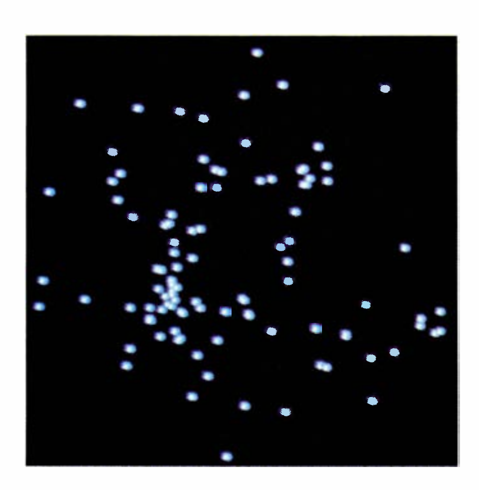
En su calidad de candidatos para explicar la materia oscura, los neutrinos presentan dos grandes ventajas sobre los otros contendientes. En primer lugar, se sabe que existen. En segundo lugar, los cálculos que han tenido tanto éxito en la descripción de la nucleosíntesis primordial sugieren también que los neutrinos ligeros deben abundar en el universo actual. Cuando se inició la nucleosíntesis de la gran explosión, a temperaturas por encima de los 10^{10} grados Kelvin (grados Celsius sobre el cero absoluto), los neutrinos ligeros se mantuvieron en equilibrio térmico con la materia mediante la interacción débil; abundaron, pues, tanto como los fotones. Así, de acuerdo con las estimaciones de R. Cowsik, del Instituto Tata de Investigación Fundamental de la India, y J. McLelland, de la Universidad de Melbourne, si la densidad actual de los neutrinos venía a coincidir con la de los fotones que forman la radiación de fondo, y si su masa estaba en el intervalo comprendido entre una diezmilésima y una cienmilésima de la masa del electrón, podían dar cuenta de la masa suficiente para cerrar el universo. (La estimación se confirmaría posteriormente mediante cálculos más detallados.)

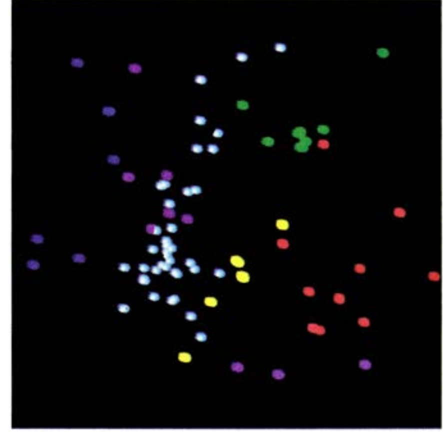
Este punto adquirió un particular interés en 1980, cuando V. A. Lubimov y sus colaboradores, del Instituto de Física Teórica y Experimental de Moscú, anunciaron que habían encontrado una prueba de que el neutrino electrónico tenía una masa comprendida en dicho intervalo. Gracias a este resultado, los neutrinos parecían los destinatarios ideales para almacenar la forma de masa dominante en el universo. Desde entonces, sin embargo, la probabilidad de que los neutrinos ligeros alberguen la materia oscura ha decrecido mucho. En primer lugar, quedan muchos interrogantes, en el ámbito experimental, acerca del resultado obtenido por los soviéticos. Un hallazgo reciente de un grupo del Instituto Suizo de Investigación Nuclear parece contradecirlo. Además, tras gran cantidad de trabajo, los astrofísicos han mostrado que las imágenes teóricas de un universo dominado por neutrinos ligeros no es tan compatible con las observaciones como se venía creyendo.

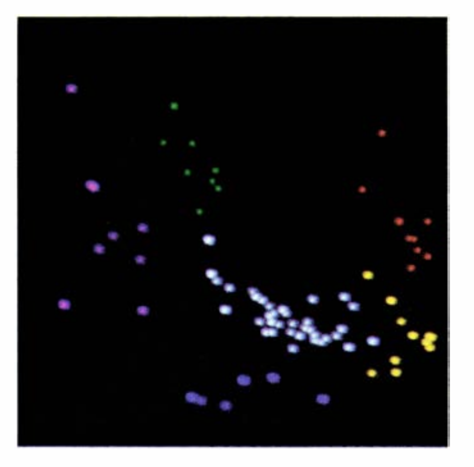
La primera de esas objeciones teóricas se planteó en 1979, a raíz de las investigaciones de Scott D. Tremaine y James E. Gunn, realizadas en el Instituto de Tecnología de California. Observaron que, por razones basadas en parte en el principio de exclusión de Pauli, los neutrinos —en el intervalo de masas relevante— no podían condensarse suficientemente para formar materia oscura en escalas mucho menores que las galaxias. La existencia de materia oscura en tales escalas se ha demostrado convincentemente mediante observaciones de galaxias esferoidales enanas.

Este trabajo no excluye la posibilidad de que los neutrinos constituyan la materia oscura en escalas mayores. Sin embargo, una propuesta de este tipo parece incompatible con importantes trabajos teóricos recientes que describen la evolución del universo primitivo, y que han demostrado que la acumulación gravitacional en gran escala (la acumulación de galaxias y de cúmulos galácticos) en la manera que probablemente ocurriría en un universo dominado por neutrinos, no se aviene con la acumulación realmente observada.

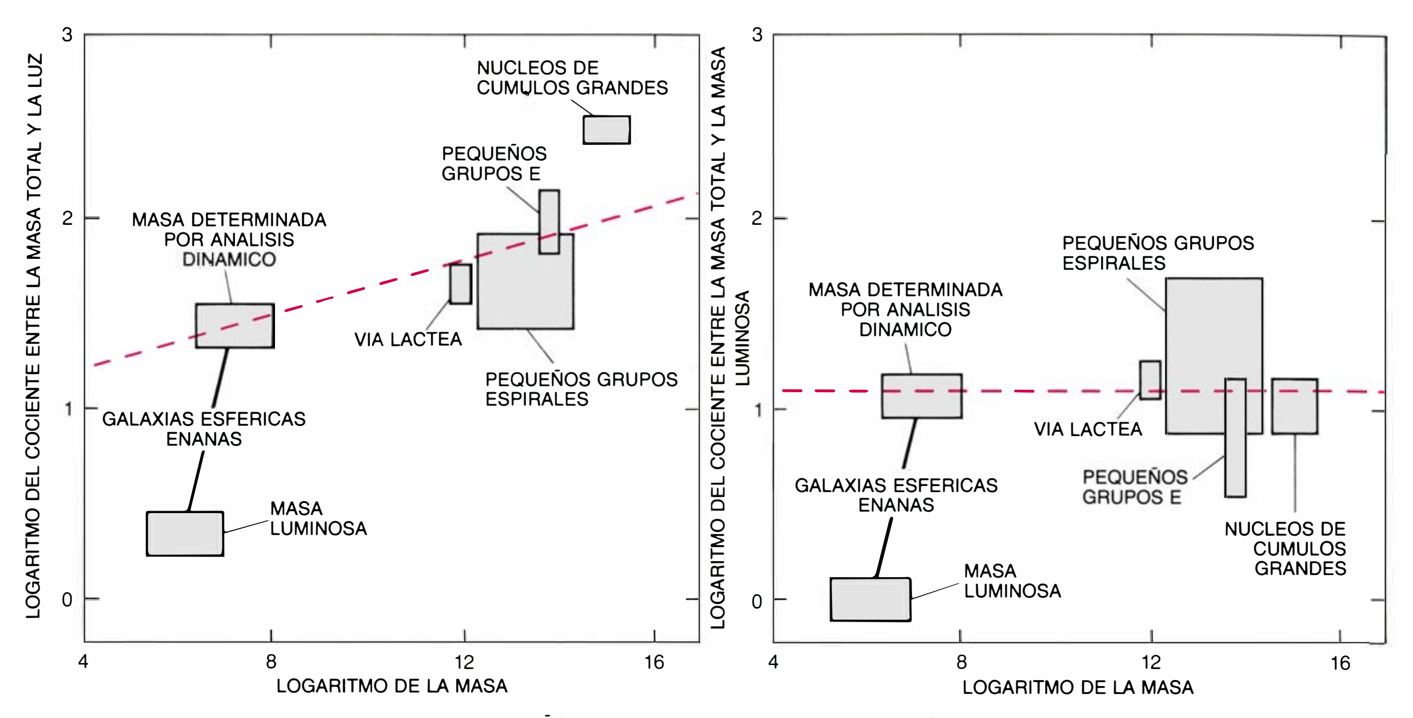
En un universo dominado por neutrinos, las primeras estructuras que se hubieran formado no se hubieran limitado a las escalas de tamaños de las galaxias, sino que alcanzarían escalas de cúmulos galácticos o incluso de supercúmulos (cúmulos de cúmulos de galaxias). A diferencia de la materia normal, los neutrinos del universo primitivo no estaban acoplados a la radiación electromagnética. A pesar de todo, durante algún tiempo no lograron agruparse apreciablemente, pues, siendo de una extremada ligereza, se movían a velocidades relativistas, y sabido es que los objetos relativistas no se ligan gravitacionalmente salvo en el







4. CUMULO DE GALAXIAS DE CANCER. Como muestran estas imágenes generadas por ordenador, no constituye un único sistema dinámico. Observado desde la Tierra (*izquierda*), el cúmulo se nos ofrece casi esférico, en equilibrio aparente. Las mediciones de las velocidades de las galaxias individuales dentro del sistema revelan que éste tendería a disgregarse a menos que contuviera una gran cantidad de materia invisible. Análisis posteriores de Gregory Bothun y sus colaboradores, del Observatorio Astronómico Smithsoniano, ponen de manifiesto que el cúmulo está formado en realidad por grupos de galaxias separados en el espacio (*centro, colores*). Una imagen girada, en un espacio tridimensional donde dos ejes representan las posiciones tal como se ven en el cielo y el tercero simboliza el corrimiento hacia el rojo (*derecha*), muestra con mayor nitidez la separación de los distintos grupos. Las velocidades relativas de las galaxias, dentro de cada grupo, son mucho menores que las velocidades relativas de los grupos (que no están en equilibrio dinámico); significa ello que hay menos masa en el sistema global que lo que se había estimado hasta entonces. Las altas velocidades relativas de los propios grupos habían sesgado el trabajo anterior. Este análisis muestra que la masa que contienen cúmulos como el de Cáncer no puede alcanzar por sí sola la cantidad suficiente para producir un universo plano; debe haber masa adicional distribuida por otras partes. Estas imágenes de ordenador fueron realizadas por Michael J. Kurtz, del Observatorio Astrofísico Smithsoniano.



5. ESTRUCTURAS DE DISTINTAS ESCALAS DE TAMAÑOS tienen diferentes razones masa-luminosidad; poseen, sin embargo, casi la misma relación entre la masa total y la masa luminosa. Debido a que las estructuras mayores tienden a mostrar razones masa-luminosidad más elevadas (*izquierda*), podría parecer que las mayores estructuras luminosas albergarían la masa suficiente para producir un universo plano. El cociente entre la masa total y la masa luminosa (más significativo desde un punto de vista físico) parece, sin embargo, mantenerse constante (*derecha*); lo que indica que las estructuras mayores no encierran, en proporción, más masa que las menores. La diferencia entre los gráficos se explica, en buena parte, por el gas caliente (que radia en el dominio de los rayos X, pero no en el dominio óptico) que se encuentra principalmente en los sistemas mayores. Los gráficos se basan en trabajos realizados por George R. Blumenthal, Joel R. Primack y Sandra M. Faber, de la Universidad de California en Santa Cruz, y Martin J. Rees, de la Universidad de Cambridge.

caso de objetos muy altamente condensados, por ejemplo los agujeros negros.

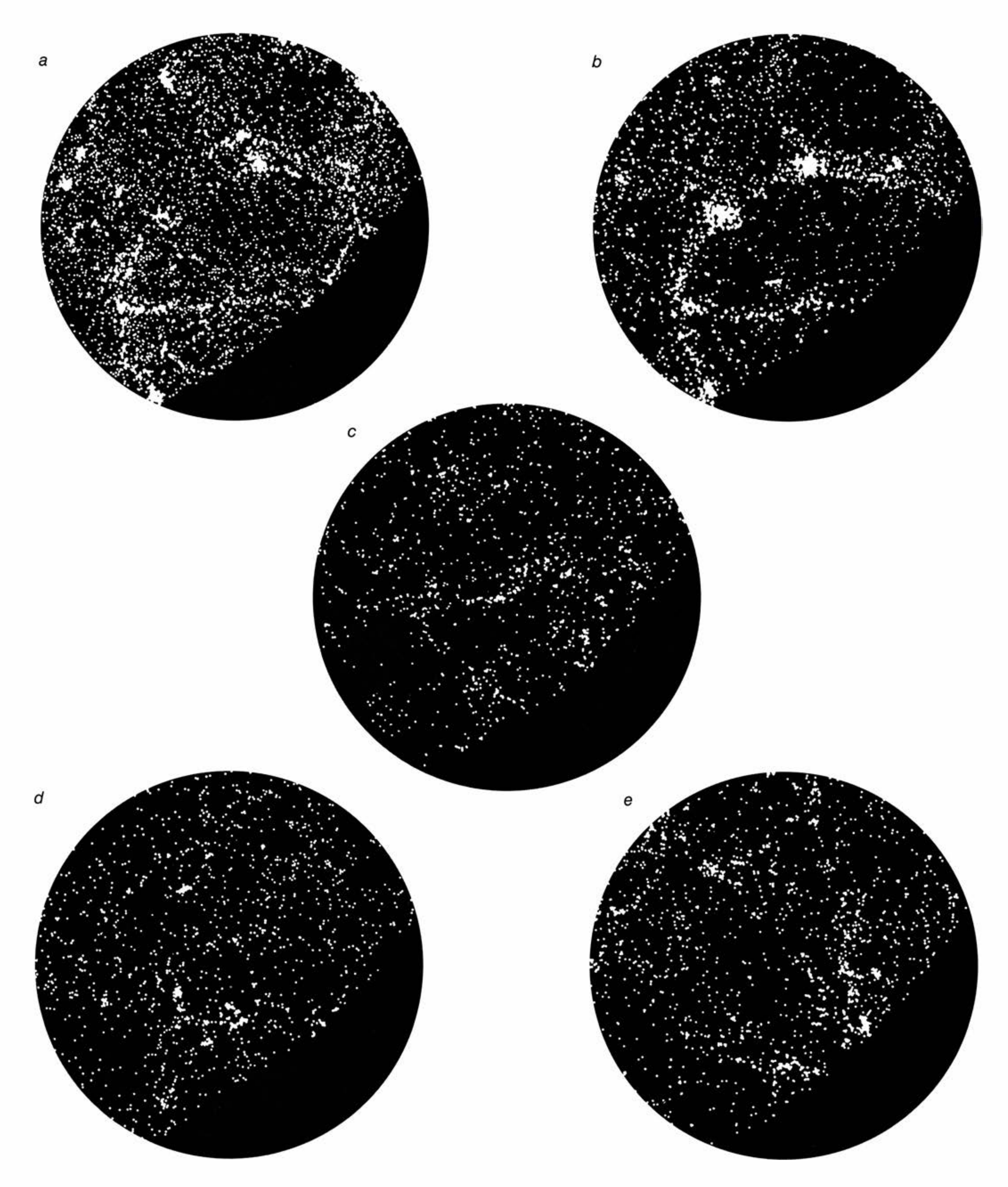
A medida que el universo se expandía, los neutrinos fueron enfriándose hasta frenarse, perdiendo su carácter relativista. Al mismo tiempo la radiación de fondo continuó enfriándose hasta energías medias por debajo de las energías de los neutrinos no relativistas. Poco antes del instante en el que la materia normal se desacoplara de la radiación electromagnética, los neutrinos cuyas masas estuvieran comprendidas en el intervalo apropiado para cerrar el universo habrían perdido su carácter relativista y habrían empezado a constituir los componentes primarios de la densidad de energía del universo. Los cálculos analíticos indican que sólo después de este instante se podrían haber agrupado gravitacionalmente. En cualquier tiempo anterior, las fluctuaciones en escalas menores que el horizonte se habrían roto, porque los neutrinos, siendo relativistas, no se habrían ligado a las zonas densas.

Así, la primera escala en que las fluctuaciones pudieron haberse desarrollado en un universo dominado por neutrinos es la correspondiente a la distancia del horizonte en el momento en que los neutrinos empezaron a agruparse gravitacionalmente. Esta escala de distancias pertenece al tamaño de los supercúmulos, no al de las galaxias. Poco después de desacoplarse, la materia normal habríase sentido atraída a pozos de potencial gravitacional, provocados por agrupaciones de neutrinos. Estas formaciones del tamaño de supercúmulos pudieron fragmentarse luego en galaxias.

Semejante cuadro de un universo dominado por neutrinos tiene muchos aspectos atractivos. Habría conducido a un sistema de supercúmulos en forma de filamentos y a grandes "vacíos" (regiones desprovistas de materia) que recuerdan aspectos identificados en las exploraciones actuales de la acumulación en gran escala [véase "Macroestructuras del universo", por Jack O. Burns; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1986]. Además, el hecho de que las formaciones de neutrinos ligadas gravitacionalmente empezaran a desarrollarse antes que los sistemas compuestos por materia normal indica que las fluctuaciones de densidad iniciales del universo podrían haber sido suficientemente pequeñas como para guardar una coherencia marginal con las medidas de la isotropía de la radiación de fondo.

Estos rasgos atractivos indujeron a Carlos S. Frenk, de la Universidad de Cambridge, Simon D. M. White, de la Universidad de Arizona, y Marc Davis, de la Universidad de California en Berkeley, e, independientemente, a Joan Centrella, de la Universidad de Drexel, y Adrian L. Melott, de la Universidad de Chicago, a desarrollar modelos numéricos para investigar la agrupación gravitacional en un universo dominado por neutrinos. Los físicos encontraron serias dificultades cuando intentaron reproducir las acumulaciones observadas. Vieron que, en un universo dominado por neutrinos, la fragmentación de los cúmulos en galaxias y la formación de éstas habría sucedido recientemente, en términos relativos (cuando el universo tuviera al menos la mitad de su edad actual) a fin de ajustarse al nivel de acumulación observado hoy. Es difícil reconciliar esta conclusión con la existencia de estructuras tales como los cuásares, que aparecieron en épocas muy anteriores.

En general, el mayor problema que una cosmología dominada por neutrinos plantea estriba en que, para que las galaxias estuvieran condensadas actualmente, las estructuras en escalas mucho mayores habrían tenido que ser bastante menos difusas que lo que son las macroestructuras observadas, pues las estructuras de escala galáctica y su-



6. SIMULACIONES NUMERICAS de configuraciones donde se formarían estructuras de gran escala en el universo. De acuerdo con tales constructos numéricos, la materia oscura no estaría constituida, probablemente, por neutrinos ligeros. Antes bien, consistiría en alguna clase de materia oscura fría: partículas que no eran relativistas en tiempos primitivos y se agruparían bajo la influencia de la gravedad antes que lo hicieran los neutrinos. Los diagramas de la ilustración muestran cómo las galaxias podrían haberse acumulado en cada marco hipotético suponiendo condiciones iniciales plausibles; los puntos representan las galaxias. En un universo lleno de suficientes neutrinos ligeros como para explicar toda la materia oscura (*a, b*), la acumulación en grandes escalas estaría mejor definida que lo que indican las observaciones reales (*c*). Las observaciones se ajùstan mucho mejor con un universo dominado por materia oscura fría cuando se formó (*d, e*). En la representación de materia oscura mostrada aquí, el universo aloja sólo en torno al 20 por ciento de la masa necesaria para que fuera plano. Las simulaciones en las que el universo contiene la masa suficiente para ser plano no se ajustan bien a las observaciones, si las galaxias se corresponden con las distribuciones de masa dominantes en él. Pero en el caso de que las galaxias no sirvan para localizar la distribución dominante, las simulaciones con materia oscura fría concuerdan bien con la estructura observada en gran escala. Las simulaciones fueron realizadas por Marc Davis, de la Universidad de California en Berkeley, George Efstathiou y Carlos S. Frenk, ambos de la universidad de Cambridge, y Simon D. M. White, de la Universidad de Arizona.

percumular se habrían formado simultáneamente. Una acumulación bien definida en gran escala presentaría también dificultades para ajustar las velocidades al azar que se predicen para las galaxias de los cúmulos a las velocidades registradas. Por estas y otras razones, parece hoy poco plausible un universo dominado por neutrinos.

Existe otra vía, fuera de los problemas que acarrean los modelos de neutrinos: la de hallar modelos en los que las galaxias se puedan formar antes que lo hagan las macroestructuras. Esto sugiere la necesidad de lo que se ha venido llamando materia oscura fría: una materia oscura tan fría (es decir, que se moviera tan despacio) que hubiera perdido ya su carácter relativista desde bastante antes que los neutrinos y pudiera, por ende, acumularse gravitacionalmente mucho antes.

El instante en que una clase de partículas deja de ser relativista constituye un factor clave para determinar el tamaño de las estructuras que pueden formarse con dicha clase de partículas. Antes de que las partículas dejaran de ser relativistas, las estructuras en escalas menores que el horizonte se romperían. Así pues, para que las galaxias se hubieran formado antes que las macroestructuras, la materia oscura fría debería haber sido no relativista para cuando el horizonte alcanzara la escala galáctica de tamaños.

Desde que se hicieron patentes los problemas relacionados con las teorías dominadas por neutrinos, se han dedicado numerosos esfuerzos al análisis de la cosmología dominada por materia oscura fría. Casi todos los resultados han sido positivos. Como las fluctuaciones de densidad pueden desarrollarse desde mucho antes, las fluctuaciones iniciales no necesitan ser tan grandes, eliminándose así cualquier conflicto con la isotropía observada de la radiación de fondo. Además, como la materia oscura fría podría haberse agrupado a escalas menores que los neutrinos, con ella se puede explicar el exceso de masa en estructuras tan pequeñas como las galaxias enanas.

Las investigaciones analíticas y numéricas detalladas son muy esperanzadoras. En este sentido, se ha demostrado que la presencia de materia oscura fría en el universo primitivo podría explicar la forma y la estructura de muchos tipos de galaxias. Con más generalidad, Frenk y George Efstathiou, de Cambridge, junto con Davis y White, han demostrado numéricamente que la acumulación en gran escala en un universo dominado por materia oscura fría se ajusta bien a la mayoría de las características observadas en las acumulaciones actuales.

Aún queda al menos un obstáculo que impide, por lo que se sabe, el completo acuerdo entre teoría y observación en un universo exactamente cerrado y dominado por materia oscura fría. ¿Dónde se esconde la materia? Aparentemente, puede acumularse con facilidad en una escala galáctica; pero, tal como he dicho, no hay ninguna prueba en favor de una densidad crítica en dicha escala. Una solución a este problema consiste en suponer que las propias galaxias no son buenos indicadores para localizar la mayor parte de las grandes concentraciones de masa: que una fracción notable de la materia oscura fría se encuentra en regiones no relacionadas con las localizaciones de estos sistemas luminosos. Pudiera ocurrir que las galaxias representaran hechos estadísticamente poco probables y que la mayor parte de la masa del universo no se hubiera condensado en las galaxias. Si fuera así, el análisis de la acumulación de galaxias daría un valor sesgado para la densidad de masa actual del universo. Las conclusiones de esta propuesta han sido estudiadas en sus pormenores y parecen crear una imagen que concuerda bien con la mayoría de los rasgos que definen las acumulaciones observadas (con algunas excepciones notables). Añádase a ello que los últimos trabajos de Frenk y sus colaboradores pintan un cuadro donde las galaxias son sucesos estadísticamente poco probables que pueden surgir de la acumulación gravitacional de manera más natural de lo que se venía creyendo.

La hipótesis de la materia oscura fría ha consolidado una estrecha relación entre la física de partículas y la cosmología. Al mismo tiempo que los cosmólogos iban aceptando la necesidad de alguna forma de materia oscura fría, los físicos de altas energías proponían la posible existencia de nuevas partículas exóticas dentro del marco de diversas teorías unificadas. Ocurre que varias de las partículas propuestas para llenar las vacantes teóricas en la física de altas energías pueden servir también, con bastante viabilidad, de constituyentes de la materia oscura fría de los cosmólogos. Estas partículas ofrecen el inconveniente de que no se han observado; a diferencia de los neutrinos, se trata todavía de meras construcciones teóricas. Sin embargo, tienen en su haber que su existencia se propusiera a extramuros de la cosmología: se postularon para resolver problemas bastante diferentes planteados en la teoría de partículas; no obstante, cada una de ellas, por razones enteramente distintas, podría responder de la materia oscura fría.

Entre los candidatos más sugestivos están los axiones. La existencia de estas partículas se deduce de manera natural de un modelo teórico desarrollado para explicar una relación especial que enlaza, en la teoría de las interacciones fuertes entre los quarks, las dos clases de simetría conocidas como conjugación de carga y paridad.

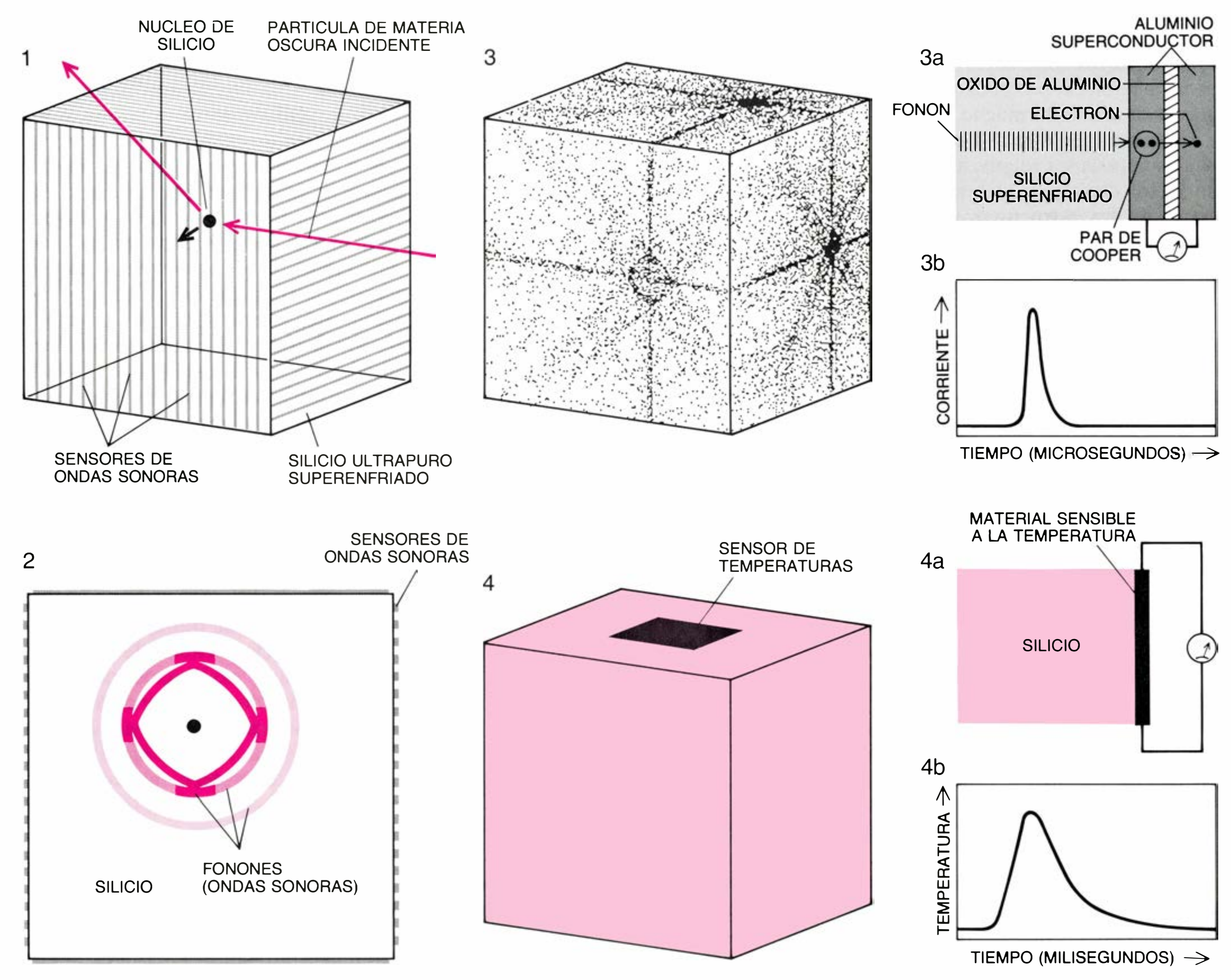
Se dice que una interacción es simétrica bajo la conjugación de carga si la interacción "parece" la misma cuando cada partícula se sustituye por su antipartícula (que tiene carga opuesta). Una interacción es simétrica bajo paridad si parece la misma al ser reflejada en un espejo. Las interacciones gobernadas por la fuerza nuclear fuerte (la fuerza que liga los quarks entre sí para formar protones y neutrones) parece ser simétrica, en un muy alto grado, bajo una especial combinación de conjugación de carga y paridad: las interacciones se asemejan mucho si todas las partículas son sustituidas por sus antipartículas y toda la interacción se refleja en un espejo. En teoría, esta combinación especial de simetrías no tiene por qué cumplirse. Las ecuaciones que gobiernan las interacciones fuertes incluyen varios términos que en principio podrían violar la combinación de simetrías.

En 1977, Roberto D. Peccei y Helen R. Quinn, que trabajaban por entonces en la Universidad de Stanford, sugirieron una explicación del cabal cumplimiento de la combinación de simetrías. Introdujeron una nueva clase de simetría: una relación entre las formas de las diferentes fuerzas fundamentales que se manifiesta a energías altas y se rompe a bajas energías. Frank Wilczek, contratado hoy por la Universidad de California en Santa Bárbara, y Steven Weinberg, de la Universidad de Texas en Austin, indicaron más tarde que el hecho de que la simetría de Peccei-Quinn se rompa revela la existencia de una nueva partícula muy liviana. La nueva partícula es el axión. Gracias a trabajos teóricos más recientes se ha refinado el modelo original y se ha aumentado la temperatura a la que es de esperar que se rompa la simetría de Peccei-Quinn. Entre las grandes sorpresas que aparecieron destaquemos la siguiente:

puesto que la existencia de los axiones depende de la rotura de la simetría, en el universo se podría formar un "campo de fondo" de axiones, algo así como si hubiera un campo eléctrico de fondo en el caso de que el universo no fuera simétrico bajo conjugación de carga (es decir, si no contuviera igual número de cargas positivas y negativas). Aunque los propios axiones son muy ligeros, los cálculos ponen de relieve que el campo de fondo global se puede agrupar de manera muy parecida a como lo harían partículas no relativistas más pesadas, convirtiendo al campo de fondo en un candidato ideal para la materia oscura.

Otro candidato para la materia oscura fría surge del marco teórico de la supersimetría. En la teoría de la supersimetría, para cada partícula actualmente conocida existe una "compañera supersimétrica": una partícula idéntica en la mayoría de los aspectos excepto en el espín. Tales partículas no se han observado todavía en el laboratorio; tendrán, pues, grandes masas. Los modelos sencillos sugieren que las compañeras supersimétricas se podrían comportar, en las interacciones con la materia normal, de manera parecida a los neutrinos muy pesados. De entre las compañeras supersimétricas, el candidato más prometedor para la materia oscura es la compañera supersimétrica del fotón: el fotino. Algunos cálculos que han realizado tanto el autor como otros investigadores han demostrado que los fotinos comprendidos en un intervalo de masas entre 1 y 50 veces la masa del protón podrían presentar, de manera natural, la suficiente abundancia cósmica para cerrar el universo actual. Aunque semejante posibilidad ha despertado un vivo interés, debo advertir que los modelos que predicen la existencia de fotinos conducen a otras afirmaciones cosmológicas que resultan difíciles de reconciliar con las observaciones.

Un último candidato, relacionado con este desfile de optantes a dar



7. INSTRUMENTOS DE DETECCION DE PARTICULAS de materia oscura que podrían construirse mediante cristales muy puros de silicio enfriados a un grado por encima del cero absoluto. Tales cristales podrían reaccionar de manera detectable ante deposiciones de energía extremadamente pequeñas. En una posible clase de detectores, cuando una partícula de materia oscura incidente choca contra un núcleo de un átomo de silicio (*1*) provoca que un conjunto de fonones, u ondas sonoras, se disperse por el material (*2*). Los fonones que llegan a la superficie del silicio presentarán una distribución característica (*3*), que dependerá de la localización e intensidad de la colisión original. Cierta configuración del detector permite registrar fonones individuales en la distribución cuando éstos inciden en la superficie del cristal. Para ello, el silicio podría incluir franjas formadas por dos capas de aluminio superconductor con una capa de óxido de aluminio entre ellas (*3a*). En los superconductores, los electrones están ligados entre sí formando parejas: los pares de Cooper. Un fonón incidente podría romper un par de Cooper y, si las capas de aluminio se mantienen a distinto voltaje, los electrones liberados podrían pasar de una capa de aluminio a otra en virtud del efecto túnel, estableciendo una corriente eléctrica (*3b*). En vez de ello, los investigadores podrían medir el incremento de temperatura del silicio después de que los fonones energéticos iniciales se hubieran disipado en un fondo uniforme de vibraciones térmicas aleatorias (*4*). Aquí el detector podría consistir en una delgada película de un material cuya resistencia eléctrica aumentara rápidamente con la temperatura (*4a*). Los cambios en la temperatura global de la muestra (*4b*) podrían determinarse a partir de los cambios experimentados en la resistencia. Los esquemas han sido realizados por George Retseck.

cuenta de la materia oscura fría, no es ni de lejos una partícula. Se trata de la cuerda cósmica. Estas estructuras son defectos topológicos de gran extensión que podrían haber surgido de la rotura de simetrías en el universo primitivo. Tomarían la forma de tubos largos y delgados de densidad de energía constante y muy grande, enrollados a lo largo del universo. Se ha trabajado intensamente con el propósito de demostrar que las cuerdas cósmicas podrían haber evolucionado de tal manera que su densidad total de energía sería menor que la necesaria para cerrar el universo. A pesar de todo, en un universo dominado por materia oscura fría y que contuviera cuerdas, el mecanismo de formación de galaxias —aunque bastante alejado de los mecanismos de los modelos típicos— puede conducir a acumulaciones que se ajusten a las observaciones.

Lo que reviste de especial atractivo a todos estos candidatos a materia oscura es la perspectiva de que cada uno de ellos pueda detectarse, directa o indirectamente, en un futuro próximo. Se pueden llevar a cabo experimentos que descartarían o, lo que es más significativo, confirmarían varias de las hipótesis. Un resultado positivo en cualquiera de estos experimentos proporcionaría una información valiosísima acerca de la evolución de las estructuras de gran escala del universo y acerca de la estructura fundamental de la materia, así como aportaría un mecanismo único para reproducir la serie de sucesos que tuvieron lugar durante los primeros segundos de la gran explosión.

Pierre Sikivie, de la Universidad de Florida, fue el primero en señalar que los axiones cósmicos, aunque interaccionan con la materia de manera extremadamente débil, podrían detectarse en cavidades de microondas (cavidades donde resuena radiación electromagnética en las frecuencias de microondas). Un campo de fondo de axiones oscilando engendraría radiación electromagnética que en principio podría detectarse mediante un dispositivo de microondas. Wilczek, John Moody, de la Universidad de California en Santa Bárbara, Donald E. Morris, del laboratorio Lawrence Berkeley, y el autor han analizado este esquema de detección y han propuesto refinamientos y esquemas alternativos. La sensibilidad necesaria para detectar axiones cósmicos parece estar cerca del límite de la moderna tecnología, y ésta mejora por días.

Los candidatos pesados, los fotinos por ejemplo, pueden detectarse de varias maneras. Recientemente sugerí, y otros investigadores lo hicieron también por su cuenta, que los candidatos pesados a alojar la materia oscura del halo galáctico podrían quedar capturados en los núcleos del Sol y de la Tierra, donde se acumularían. Allí, lo demostraron cálculos posteriores, podrían chocar con sus antipartículas (que podrían también ser capturadas) en reacciones de aniquilación que producirían neutrinos ligeros. Estos podrían escapar entonces del núcleo del Sol y de la Tierra y medirse con grandes detectores subterráneos. Al no haberse detectado tal flujo de neutrinos ligeros, se establecen límites para las masas y densidades de los candidatos pesados a la materia oscura.

Se acaba de señalar que las partículas pesadas de materia oscura podrían también detectarse directamente mediante ciertos dispositivos sensibles a las deposiciones muy pequeñas de energía en grandes volúmenes de materia. Hace poco se propuso una nueva clase de detectores de este tipo. El dispositivo presentado por Blas Cabrera, de Stanford, Wilczek y el autor de este artículo está diseñado para medir un pequeño incremento en la temperatura de una gran muestra de silicio ultrafrío o de otro material cristalino puro. El incremento de temperatura tendría lugar cuando las ondas sonoras producidas por el impacto de las partículas de materia oscura se dispersaran y se distribuyeran por el material. El trabajo de Cabrera, Barbara Neuhauser y Jeffrey C. Martoff, en Stanford, sugiere que podría detectarse directamente las propias ondas sonoras [*véanse los esquemas de la figura 7*].

Cabe incluso la posibilidad de que las cuerdas cósmicas se detecten pronto, ya sea por sus efectos gravitacionales directos sobre la luz de cuásares distantes y la radiación de fondo de microondas (las concentraciones de energía tan densas como las cuerdas cósmicas deberían crear campos gravitacionales que curvarían bastante la luz) o indirectamente, midiendo las ondas gravitacionales u otra radiación que habrían de emitir en su evolución.

La solución al problema de la materia oscura podría tener amplia resonancia en muchas áreas de la física y la astronomía. Están en juego nociones fundamentales de la cosmología y la física de partículas, y es una suerte que cada campo —provocando a menudo activos debates en el otro— haya intervenido en la evolución simbiótica de esta área de la investigación.

Importa reconocer, sin embargo, que, en muchos aspectos, la cosmología se halla en pañales. Hay pocos datos experimentales y observacionales con los que puedan trabajar los teóricos. Nada tendría de extraño, pues, que se produjeran cambios drásticos en el asunto y una gran parte de lo que tenemos por seguro fuera erróneo. Este extremo lo confirman varios resultados nuevos que surgieron durante la redacción de nuestro artículo, cualquiera de los cuales podría incidir profundamente en este campo.

Un nuevo resultado observacional lo han aportado los análisis preliminares de una exploración del cielo profundo, acometida por Margaret J. Geller, John P. Huchra y sus colaboradores del Observatorio Astrofísico Smithsoniano de Harvard. Parece ser que las galaxias próximas se acumulan en superficies peliculares que rodean zonas esféricas casi vacías, en una estructura que recuerda las pompas de jabón o las burbujas de espuma. Esta importante observación, que podría trastocar por entero la imagen que los cosmólogos tienen de la estructura de gran escala, sugiere que otras fuerzas distintas de la gravitatoria pudieran tomar parte activa en la determinación de la actual macroestructura.

En otro nuevo desarrollo, realizado independientemente por Tremaine (ahora en el Instituto Canadiense de Astrofísica Teórica) y J. Anthony Tyson, de los laboratorios AT&T Bell, se afirma que las curvas de rotación de galaxias quizá no fueran indefinidamente planas, sino que parecen decrecer a partir de radios de unos 30 kiloparsecs. Esto implicaría que, al margen de cuál sea el constituyente de la materia oscura, ésta interaccionaría más intensamente con la materia normal que lo que se esperaba de la materia oscura fría.

Por último, datos recientes relativos a los movimientos con respecto a la radiación de fondo de microondas de regiones de materia en escalas muy grandes han proporcionado pruebas de que dichas regiones se mueven, en conjunto, con una altísima velocidad de arrastre. Ninguna teoría actual de macroestructuras puede explicar por qué aparece este fenómeno. Nuevas mediciones de este tenor, así como la posibilidad de detectar la propia materia oscura, podrían revolucionar muy pronto la imagen del universo que hoy damos por aceptada.

Ciencia y sociedad

¿Lo que el viento se llevó?

Hace un año, un grupo de físicos anunció el descubrimiento de una nueva fuerza fundamental. El hallazgo venía a aumentar hasta cinco el número de fuerzas que determinan la naturaleza de la materia; las otras son la gravedad, el electromagnetismo y la fuerza electrodébil (reconocidas ya como una sola entidad) y la fuerza nuclear fuerte. Dos físicos insisten ahora en que el tema de la quinta fuerza carece de toda base.

Los abogados de la quinta fuerza, encabezados por Ephraim Fischbach, de la Universidad de Purdue, efectuaron su descubrimiento revisando los registros de los experimentos realizados a principios de siglo, en Budapest, por el barón Roland von Eötvös. Sus mediciones de la tensión ejercida sobre una balanza de torsión por pesos de diversos materiales se habían considerado prueba de la noción, avanzada ya por Galileo, de que la gravedad afecta a los objetos sin importar cuál sea su composición.

La cuestión permaneció en el olvido hasta que Fischbach y sus colegas, en una colaboración en *Physical Review Letters*, informaron de que los datos de Eötvös presentaban diminutas discrepancias, aparentemente insignificantes, que parecían variar en función del número de bariones (protones y neutrones) por unidad de masa de los pesos. En opinión del grupo de Fischbach, ello venía a sugerir la existencia de una fuerza sensible a los bariones que provocaría una débil repulsión mutua entre los objetos hasta distancias de alrededor de los 300 metros. Esa fuerza, seguían escribiendo, explicaría algunas cuestiones pendientes, como por ejemplo, por qué parece ser mayor la constante gravitatoria bajo tierra que en la superficie.

Shu-Yuam Chu, de la Universidad de California en Riverside, y R. H. Dicke, de la de Princeton, han propuesto una explicación a todas luces banal de las variaciones registradas por los datos del barón. Argumentan, en *Physical Review Letters*, que la temperatura del aire del laboratorio de Eötvös pudo registrar ligeras variaciones, que generarían suaves corrientes que ejercerían sobre los pesos una presión proporcional a su tamaño. Dicke dice haberse topado con esas corrientes de convección cuando, en la década de 1950, intentó reproducir los experimentos de Eötvös. Existe aún una posibilidad de que Fischbach lleve razón, afirma Dicke, "pero la considero poco probable", añade.

Fischbach opina que la hipótesis de Chu-Dicke es "muy inteligente y merece un estudio detallado", pero considera que tampoco está libre de defectos. Señala que las discrepancias de los datos de Eötvös son coherentes a todo lo largo de las 4000 horas que el barón dedicó a sus experimentos. "¿Quién puede esperar que las corrientes que se dan en una habitación se mantengan constantes día tras día y año tras año? En la mía tengo un móvil que no cesa de cambiar de dirección."

Dicke y Fischbach coinciden en que la experimentación resolverá pronto el asunto. Varios científicos están ensayando, por ejemplo, si las grandes masas de tierra verticales ejercen, sobre los objetos próximos, una fuerza de repulsión que varíe en función de su composición bariónica. Peter Thieberger, del Laboratorio Nacional Brookhaven, ha experimentado en las Palisades, los acantilados que bordean el río Hudson en New Jersey. Val L. Fitch, de Princeton, trasladó su equipo experimental hasta Montana. "Necesitaba una montaña", se excusa.

Si se prueba la existencia de la quinta fuerza, afirma Fitch, los físicos teóricos que persiguen una teoría unificada de las fuerzas elementales no tendrán que dar por perdido su trabajo: "Los teóricos muestran una especial maña en darse de bruces en cuanto se les opone algún hecho experimental nuevo".

Ozono

Se han efectuado últimamente dos observaciones relativas a la capa de ozono que protege la biosfera de la radiación solar ultravioleta. Por un lado, las mediciones desde satélites parecen confirmar que la capa de ozono se agota progresivamente. Desde 1979, según indican las mediciones, las concentraciones de ozono han descendido, en las latitudes medias del hemisferio Sur, hasta un 18 por ciento. Por otro, y coincidiendo también con esas fechas, se observa sobre la Antártida cada primavera austral, en septiembre y noviembre, un agotamiento más espectacular aún —que ha dado en llamarse "agujero" de ozono—. Durante el verano el agujero se rellena, pero cada año se renueva y alcanza mayor profundidad: la concentración media de ozono sobre la Antártida fue, en octubre de 1985, un 40 por ciento inferior a la de octubre de 1979. Recientemente se han ocupado del tema numerosos artículos, y *Geographical Research Letters* (*GRL*) le ha dedicado una edición monográfica; se desprende de ellos la inexistencia de un acuerdo acerca de la causa del fenómeno. Tampoco se coincide en la relación que puedan guardar el agujero antártico y el agotamiento global del ozono.

Para algunos científicos, el agujero viene a constituir el aviso de un inminente desastre general: un ejemplo extremo de destrucción del ozono provocada por clorofluorocarburos artificiales. En la estratosfera, la luz ultravioleta los descompone y libera cloro, que cataliza la degradación del ozono (O_3) en oxígeno molecular (O_2). En 1978, en Estados Unidos se prohibió el empleo de esos productos como propulsores de los aerosoles, pero siguen utilizándose de refrigerantes y agentes espumantes; en la mayoría de países persiste su uso como propulsores. En consecuencia, su concentración atmosférica sigue creciendo sobre el Antártico a un ritmo del 5 por ciento anual.

Una segunda teoría, postulada por Linwood B. Callis, del Centro de Investigación Langley de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), y Murali Natarajan, de SASC Technologies, Inc., de Hampton, Virginia, sostiene que tanto el agujero antártico como el agotamiento global del ozono son obra de óxidos de nitrógeno de origen natural. Según Callis y Natarajan, los niveles de óxidos de nitrógeno de la baja estratosfera aumentan y decrecen siguiendo el ciclo de 11 años de actividad solar. Cerca de un máximo solar (el último de los cuales se produjo en 1979), el vórtice polar meridional (un patrón circular de corrientes situado sobre la Antártida durante el largo invierno polar) arroja a la baja estratosfera grandes cantidades de compuestos nitrogenados que se generan por encima de la estratosfera. El sol de primavera fotoliza algunos de esos compuestos en NO y NO_2, que destruyen el ozono. Del Antártico, los óxidos de nitrógeno se extienden por la estratosfera y destruyen el ozono de otras zonas del globo. Aun cuando la teoría no exonera en modo alguno a los clorofluorocarburos, propone que la mayor porción del agotamiento del

ozono observado hasta la fecha es cíclica y responde a causas naturales.

Por último, algunos científicos insisten en que el agujero antártico y la pérdida global de ozono constituyen dos fenómenos esencialmente distintos, y que el hueco no lo generan productos químicos, sino el viento. En una colaboración en *GRL*, Richard S. Stolarski y Mark R. Schoeberl, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA, informan que la cantidad total de ozono atmosférico desde los 44 grados de latitud Sur hasta el polo se mantiene inalterada durante la formación del agujero primaveral. Una posible explicación de ese fenómeno sería que las corrientes ascendentes de aire apartaran del polo el aire rico en ozono de la estratosfera y lo sustituyeran por aire pobre en ozono procedente de latitudes inferiores; el aire rico en ozono se concentraría en un anillo situado en latitudes subpolares, donde se han detectado altas concentraciones de ozono. El incremento anual de la profundidad del agujero respondería, según esa teoría, a que, por razones aún no aclaradas, también se ha intensificado la surgencia.

En una reciente expedición a la Antárdida se han recogido datos que cuestionan las teorías del ciclo solar y del viento, pese a lo cual la controversia probablemente tarde varios años en resolverse. La persistencia de la profundización del agujero antártico haría recaer las culpas sobre los clorofluorocarburos; y a la inversa, la recuperación de los niveles de ozono vendría a apoyar una de las dos teorías. Las mediciones desde satélites señalan que en 1986 el agujero fue menos intenso que en 1985, cuando los niveles de ozono alcanzaron sobre el Antártico un mínimo histórico; sin embargo, es pronto aún para decidir si la reciente recuperación señala un cambio de tendencia.

En el ínterin, la Agencia estadounidense de Protección Ambiental (EPA) ha sumado su voz al coro. Un borrador hecho público en noviembre por funcionarios de la Agencia prevé que, hasta 2074 y sólo en los Estados Unidos, el agotamiento del ozono podría provocar 40 millones de casos de cáncer de piel (de los que 800.000 resultarían fatales). La previsión atribuye a los clorofluorocarburos el debilitamiento de la capa de ozono y considera que el crecimiento de las emisiones se mantendrá en el 2,5 por ciento anual. Entienden algunos especialistas que el informe, sometido aún a revisión científica, es, cuando menos, precipitado; John R. Wiesenfeld, de la Universidad de Cornell, lo juzgó "irresponsable y prematuro".

Señalan otros observadores, en cambio, que si los clorofluorocarburos fueran en verdad los causantes del acortamiento de la capa de ozono, la administración cometería una imprudencia si esperara a la obtención de pruebas más concluyentes para limitar las emisiones.

Los años infelices

¿Declina el bienestar de los adolescentes? Peter Uhlenberg y David Eggebeen, de la Universidad de Carolina del Norte, escriben en *The Public Interest* que las mejoras registradas por algunos barómetros tradicionales de la salud de los quinceañeros norteamericanos enmascaran un "declive constante y grave" del bienestar de los adolescentes entre 1960 y 1980.

En un estudio de índices aceptados del bienestar de los jóvenes blancos, Uhlenberg y Eggebeen han encontrado que la proporción de los que habitaban hogares sin pobreza, no pertenecían a familias numerosas y no poseían progenitores con escasa formación escolar se duplicó (del 32 al 63 por ciento) a lo largo de esas dos décadas. También se multiplicó por dos la financiación escolar por alumno. Sin embargo, contrastan con esas cifras ciertas tendencias inquietantes: un descenso del 11 por ciento en las puntuaciones del test verbal SAT y el incremento en más del doble de los índices de delincuencia juvenil, de nacimientos ilegítimos, del consumo de drogas y de suicidios.

De ese deterioro, Uhlenberg y Eggebeen culpan en primer lugar a los padres modernos, quienes, según afirman los investigadores, se sacrifican menos por sus hijos y les dedican menos "tiempo de calidad": tendencias denunciadas por el incremento de la tasa de divorcios y la creciente incorporación de la mujer a la actividad laboral.

Otros investigadores son más remisos a aceptar esa relación. "Resulta razonable suponer, afirma Leon Eisenberg, de la Facultad de Medicina de Harvard, que el vivir en la era nuclear, los índices de paro y la degradación del entorno público guarden relación con el incremento de la tasa de ruptura social, pero carecemos de la metodología que lo demuestre."

Según Deborah K. Walker, de la Facultad de Salud Pública de Harvard, bajo diversas "conductas de riesgo" subyacen raíces comunes. El abandono de la escuela y el consumo de drogas no constituyen problemas aislados, sino, en opinión de Michael S. Jellinek, del Hospital General de Massachusetts, "rutas finales comunes" derivadas de un amplio abanico de presiones que se ejerce sobre la juventud.

La identificación de las tensiones que suelen acompañar a la ruta final común permite entresacar grupos de adolescentes en peligro, y así ofrecer un centro de atención a la intervención gubernamental, local y familiar. Ese es uno de los objetivos del programa de un año "Agrupación de Fuerzas contra el Suicidio Juvenil", desarrollado por el Departamento de Salud y Servicios Sociales de los Estados Unidos. En una reunión celebrada a finales del año pasado, el grupo emprendió la clasificación, para su empleo como señal de intervención, del centenar de factores que, según se cree, precipitan el suicidio, la segunda causa de muerte, después de los accidentes, de jóvenes de entre 15 y 19 años.

Según James A. Mercy, del Centro Norteamericano de Control de Enfermedades, entre los factores sociales asociados con el crecimiento de la tasa de suicidios de adolescentes (que se ha triplicado en los últimos 30 años) se cuentan el efecto cohorte (competencia por unos recursos limitados), la inestabilidad familiar, el consumo de drogas y otras sustancias y el incremento de la disponibilidad de armas de fuego.

Otro factor social citado a menudo es el efecto que ejercen los medios de comunicación de masas. Dos estudios recogidos en el *New England Journal of Medecine* asocian la televisión con un tipo de conducta de riesgo al que se presta hoy mucha atención: la imitación de los suicidios descritos en los noticiarios o presentados en las películas televisivas.

David P. Phillips y Lundie L. Carstensen, de la Universidad de California en San Diego, han analizado el número de suicidios de adolescentes denunciados la semana siguiente a que algún noticiario o programa de televisión abordara el tema. En un estudio de 38 relatos emitidos a toda la nación desde 1973 hasta 1979 encontraron que, por término medio, en la semana siguiente al programa se producían unos tres suicidios de adolescentes más de lo que cabría predecir en razón de otros factores.

Gould y David Shaffer, de Columbia, analizaron el efecto de cuatro programas de ficción sobre suicidio emitidos en el área de Nueva York. En las dos semanas que siguieron a su difusión aumentaron los índices de suicidios intentados y consumados.

El primer retrovirus humano

Esta es la primera entrega de una serie de dos sobre retrovirus humanos. En 1978 se identificó el primero, que produce una leucemia poco frecuente. Ese descubrimiento propiciaría la identificación del virus que causa el SIDA

Robert C. Gallo

En la naturaleza, lo habitual es que la información genética fluya del ADN, donde reside, a las proteínas, las moléculas funcionales de la célula, pasando por el ARN, que sirve de intermediario. Durante muchos años se creyó que ese flujo de información genética era unidireccional, hasta tal punto que dicho supuesto constituía el llamado "dogma central" de la biología molecular. Sin embargo, hace algún tiempo el descubrimiento de un grupo de organismos capaces de invertir el sentido del flujo conmovió los cimientos del dogma central. Se trata de los retrovirus, cuyo material genético es ARN. Poseen además una enzima, la retrotranscriptasa, que utiliza el ARN vírico de molde para fabricar una copia en ADN. Este se integra en los cromosomas de la célula hospedadora y sirve de base para la replicación del virus.

El descubrimiento de la retrotranscriptasa causó un verdadero impacto; vino a esclarecer procesos biológicos fundamentales y, a la vez, permitió conocer el mecanismo patogénico de los retrovirus. Se sabía que esos virus producían cáncer en los animales, sobre todo leucemias, que son tumores originados en los glóbulos blancos. Resultaba lógico, por tanto, buscar virus que ejercieran un efecto similar en el hombre. Empero, las dificultades, tanto teóricas como técnicas, eran tales que hasta 1978, casi una década después de descubrirse la retrotranscriptasa, no conseguimos, mis colegas y yo, aislar el primer retrovirus humano.

Lo bautizamos virus linfotrópico de las células *T*, por su avidez por dicho tipo de linfocitos, glóbulos blancos que desempeñan un papel decisivo en la modulación de la respuesta inmunológica. Se trata de un virus cancerígeno: cuando entra en la célula *T*, desencadena el proceso que causa la leucemia. (Por esa razón, a veces se le conoce por virus de la leucemia de las celulas *T*.) La utilización de técnicas epidemiológicas y de biología molecular nos permitió obtener gran cantidad de información sobre ese patógeno y su modo de acción. Es más, pronto empezamos a descubrir virus emparentados. En 1982 hallamos un segundo retrovirus humano, que también producía leucemia. Desde entonces, el virus linfotrópico de células *T* pasó a llamarse HTLV-I y, el segundo, HTLV-II.

Más sorprendente aún resultó descubrir que el agente causante del síndrome de inmunodeficiencia adquirida (SIDA) es un virus parecido, el HTLV-III. La sorpresa nace, en parte, de que SIDA y cáncer ejercen efectos opuestos. El cáncer insta una proliferación incontrolada de células *T*, mientras que el SIDA provoca su muerte y el consiguiente desarme del sistema inmunológico. Así, a los cinco años del aislamiento del primer retrovirus humano, se había descrito dos tipos distintos de virus, de efectos patogénicos muy diferentes. La historia del descubrimiento de esos dos tipos de virus constituye uno de los relatos más apasionantes de la biología del siglo XX. La expondremos en dos partes. La primera, este artículo, describe el hallazgo del HTLV-I. La segunda parte, que aparecerá en el próximo número de *Investigación y Ciencia*, se dedicará al virus del SIDA.

Escepticismo inicial

Los acontecimientos que precedieron al descubrimiento del primer retrovirus humano estuvieron rodeados de un gran escepticismo. En primer lugar, se dudaba de que los agentes infecciosos guardaran relación con el cáncer; después, de que llegara a encontrarse retrovirus en el hombre. Pronto se demostró que los retrovirus sí producían tumores, al menos en experimentos de laboratorio. El primer retrovirus lo aisló Peyton Rous, en 1910, en el Instituto Rockefeller de Investigaciones Médicas. Demostró que dicho virus, que hoy se conoce como virus del sarcoma de aves, inducía tumores en los músculos, huesos y vasos sanguíneos de pollos.

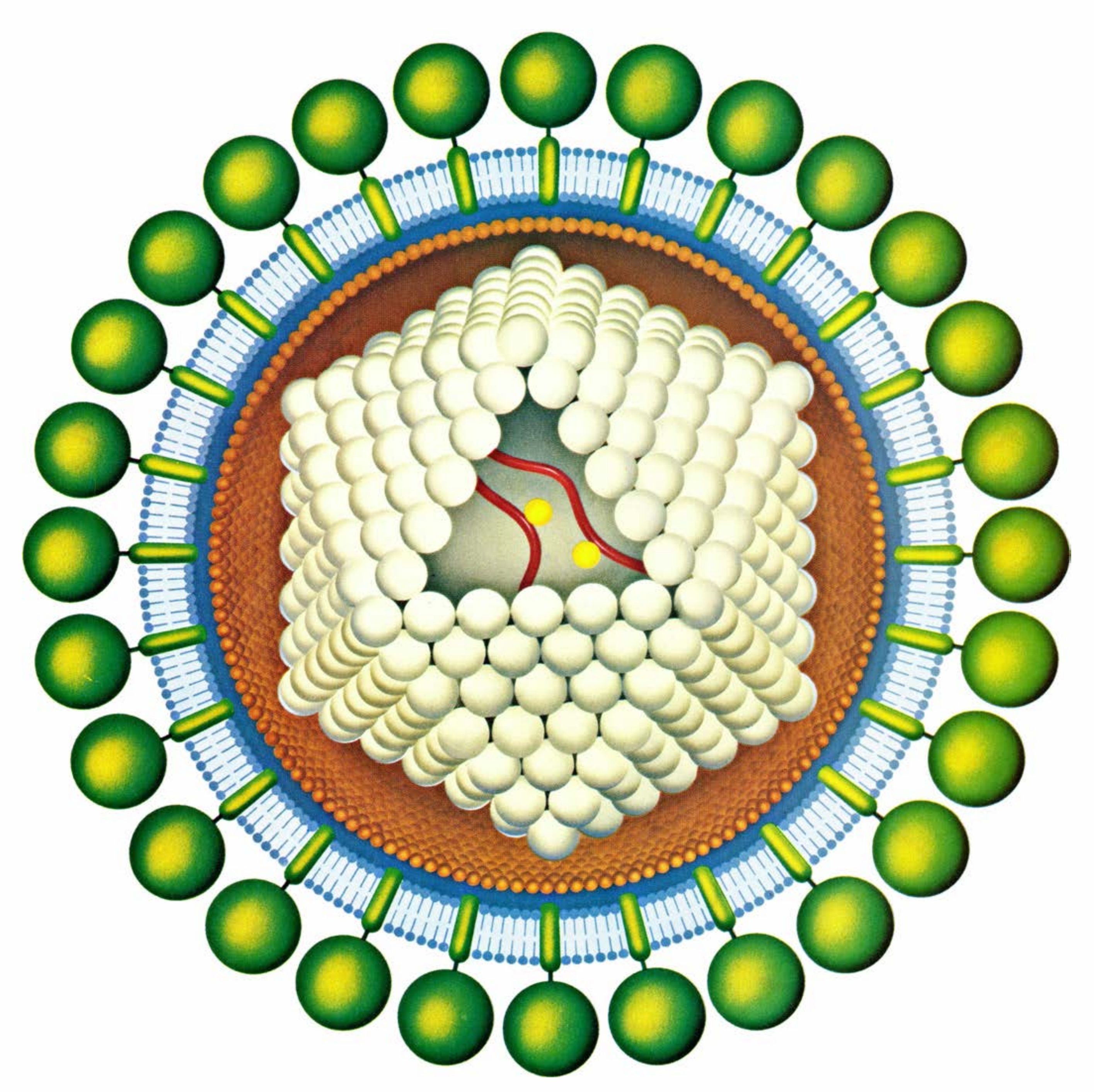
Los hallazgos de Rous provocaron tal incredulidad que pronto abandonó sus investigaciones sobre los retrovirus, abriéndose un período de letargo en ese campo que habría de perdurar hasta los años cincuenta. Durante esa década y la siguiente, Ludwik Gross, de la Facultad de Medicina Monte Sinaí, y otros investigadores encontraron retrovirus capaces de inducir tumores en ratones, pollos y otras especies. No obstante, la mayoría de los biólogos dudaba aún de la capacidad de esos agentes infecciosos para transmitir el cáncer fuera del laboratorio. No se olvide que los animales empleados en los estudios sobre retrovirus eran estirpes consanguíneas de laboratorio. Además, muchas de las infecciones eran congénitas, y parecía poco probable un sistema de transmisión similar en el hombre.

Así, en 1960 no resultaba descabellado sostener que los retrovirus eran poco más que curiosidades de laboratorio. Todo ello cambió cuando, a principios de la década de 1960, William Jarrett, de la Universidad de Glasgow, descubrió el virus de la leucemia de felinos (FeLV). Jarrett, que había estudiado veterinaria, demostró que el FeLV producía también aplasias (desarrollo insuficiente de las células afectadas) y una deficiencia inmunológica similar a la que posteriormente se ha observado en los afectados por el SIDA. Un descubrimiento no menos importante de Jarrett (realizado junto con su hermano y colaborador Oswald Jarrett, Myron Essex, de la Universidad de Harvard, y William D. Hardy, Jr., del Centro Oncológico Memorial Sloan-Kettering) fue que la enfermedad causada por el FeLV se transmitía, en su

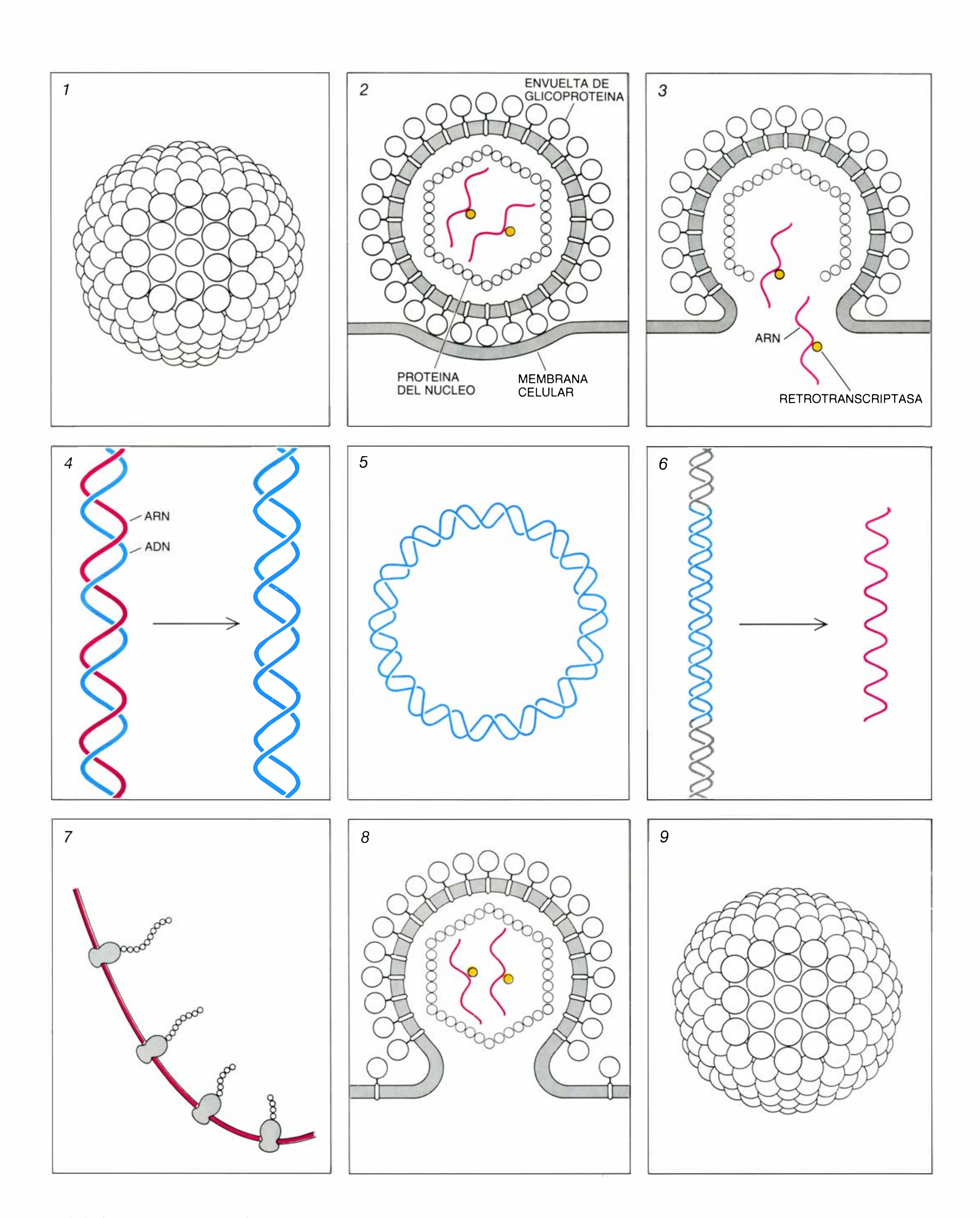
entorno doméstico natural, entre gatos no emparentados.

Con el hallazgo de los FeLV, los retrovirus se libraron de su reputación de meras curiosidades de laboratorio. Sin embargo, no parecía interesar excesivamente el descubrimiento de agentes infecciosos similares en el hombre. Una de las razones de ello era que la atención de las investigaciones estaba absorbida por los retrovirus endógenos. Se trata de virus cuyo material genético se encuentra en los cromosomas de muchas especies animales, presumiblemente como rastro de una antigua infección. En algunos casos, esas secuencias de ADN endógeno son capaces de generar partículas víricas funcionales e infecciosas. Por regla general, no obstante, se transmiten a otros miembros de la especie siguiendo un tipo de herencia mendeliana simple, a través de los óvulos o los espermatozoides. En 1969, Robert J. Huebner y George J. Todaro, del Instituto Nacional del Cáncer de los Estados Unidos, propusieron una teoría según la cual la activación de esas secuencias endógenas, normalmente silenciosas, por parte de algún carcinógeno constituía el mecanismo común a todas las enfermedades cancerosas.

Pero la verdad es que todas las enfermedades que han podido atribuirse a retrovirus se deben a virus exógenos. Los endógenos se consideran hoy enig-



1. MODELO DE UN VIRUS, donde se pone de manifiesto gran parte de lo que conocemos acerca de la estructura del primer retrovirus humano, el virus linfotrópico de células *T* humanas de tipo I (HTLV-I). La ilustración muestra un corte transversal del virión, o partícula del virus. La partícula mide aproximadamente unos 1000 angstrom (una diezmilésima de milímetro). La envuelta externa es una doble capa de material lipídico (grasa), atravesada por proteínas (*verde*). Dicha envuelta recubre un núcleo que contiene varios tipos de proteínas (*marrón claro y marfil*). En el núcleo se encuentran también dos moléculas de ARN (*rojo*). El ARN contiene la información genética que necesita el virus para sintetizar todos sus componentes y, por tanto, autorreproducirse. Unidas al ARN se encuentran varias copias de la enzima retrotranscriptasa (*amarillo*), que utiliza de molde el ARN vírico para fabricar una molécula bicatenaria de ADN.



2. CICLO DE VIDA DE UN RETROVIRUS, que comprende la integración del genoma vírico (todo su material genético) en el ADN de la célula hospedadora. La partícula vírica (*1*) interactúa con la membrana de la célula hospedadora (*2*), que en el caso del HTLV-I es un glóbulo blanco denominado linfocito *T*. La membrana del virus se funde con la membrana externa de la célula (*3*), liberando el contenido del virión en el citoplasma, donde la retrotranscriptasa fabrica una cadena de ADN complementaria del ARN. A continuación, y a medida que se degrada el ARN, se elabora la segunda cadena del ADN (*4*). El ADN bicatenario migra al núcleo de la célula, adopta una estructura circular (*5*) y se integra al azar en los cromosomas del hospedador (*6*). Posteriormente, el ADN vírico puede transcribirse en ARN, que se traducirá en proteínas en los ribosomas del citoplasma (*7*). Las proteínas recién sintetizadas y el ARN vírico se ensamblan y se forma un nuevo virión que, a modo de brote (*8*), y tras incorporar material lipídico de la membrana celular externa, sale al medio extracelular (*9*).

mas evolutivos de escasa importancia clínica. A finales de los años 60, apenas si se prestaba atención a los virus exógenos, ganada por el interés generado por la ubicuidad de sus parientes endógenos.

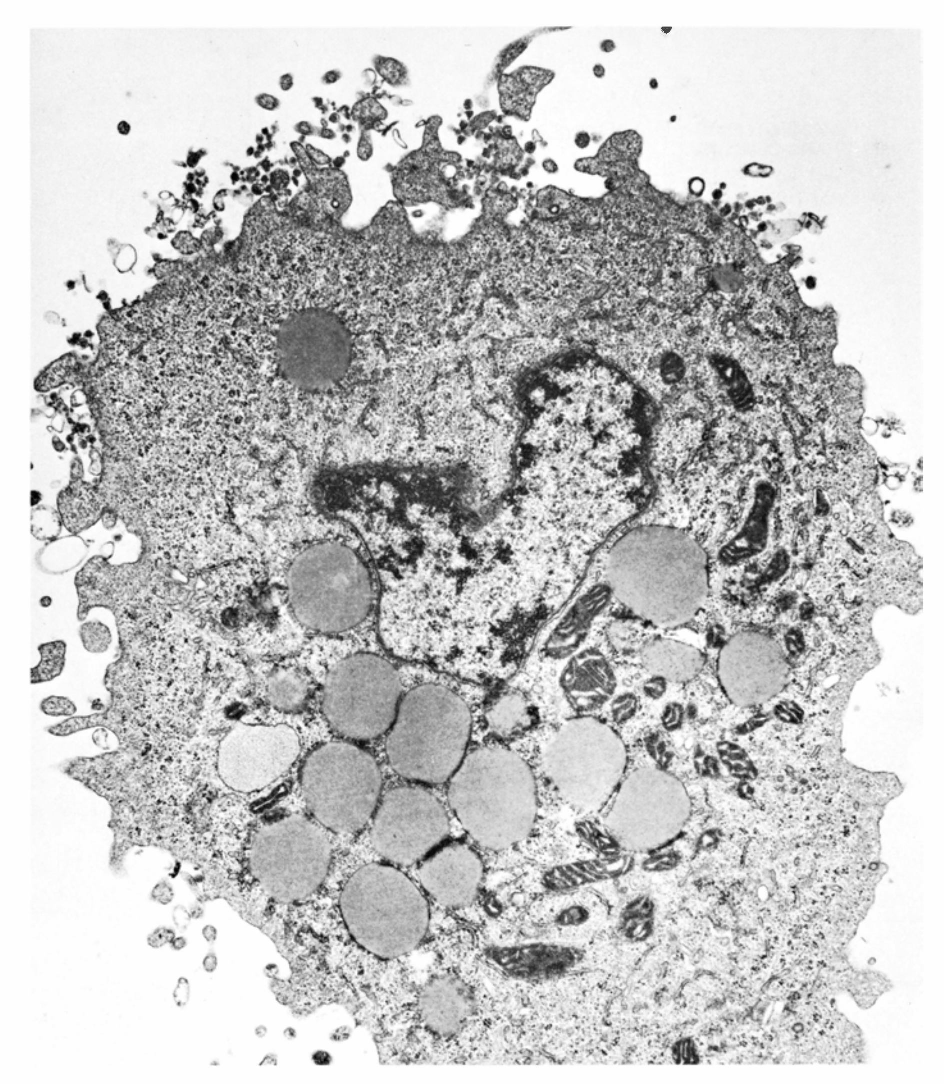
Retrotranscripción

El atractivo de la teoría de Huebner-Todaro no era el único problema al que tuvieron que enfrentarse los que, en 1969, investigaban la relación entre virus exógenos y cáncer. Existía también una dificultad de índole teórica: no se entendía que el genoma de los virus, que, según se sabía, era de ARN, interactuara con los genes de la célula hospedadora al inducir un tumor. Howard M. Temin, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Wisconsin, había propuesto que el ciclo de vida de un retrovirus exógeno comprendía una fase intermedia en forma de ADN, denominada provirus; pero quedaban oscuros muchos puntos en su teoría.

El descubrimiento, por parte de Temin, de la retrotranscriptasa (que también logró, de modo independiente y simultáneo, David Baltimore, del Instituto de Tecnología de Massachusetts) aportó una base concreta a la teoría del provirus; de inmediato encajaron las distintas etapas de su ciclo de vida. Cuando el retrovirus infecta una célula, la retrotranscriptasa sintetiza una molécula de ADN con la misma información que porta la molécula de ARN vírico. El ADN se abre camino hasta el núcleo y se integra entre los genes del hospedador. Posteriormente, y tras algún tipo de interacción con los genes del hospedador, puede originar un tumor. Puesto que el ADN vírico lleva la información necesaria para sintetizar los componentes del virus, también puede, tras activarse, generar nuevas partículas víricas.

En 1970, cuando Temin y Baltimore profundizaban en el estudio de la retrotranscriptasa, mis investigaciones se centraban en las polimerasas de ADN de las células de la sangre, enzimas que sintetizan ADN. La retrotranscriptasa es uno de los miembros, poco corriente por cierto, de ese grupo de enzimas. Influido por las ideas de Temin, decidí iniciar la búsqueda de retrotranscriptasas en células leucémicas humanas, con la esperanza de encontrar en ellas algún retrovirus.

Al embarcarme en esa empresa iba contracorriente. Los virus que producen leucemias en animales (como los de pollos, ratones y gatos, que ya se conocían bien) se multiplican repetidamente antes de formarse el tumor. Las nuevas partículas víricas se visualizan fácilmente al microscopio electrónico. En las meticulosas observaciones de células leucémicas humanas realizadas al microscopio electrónico no se había observado esas partículas, de lo que la mayoría de los investigadores concluyó que no existían retrovirus humanos.

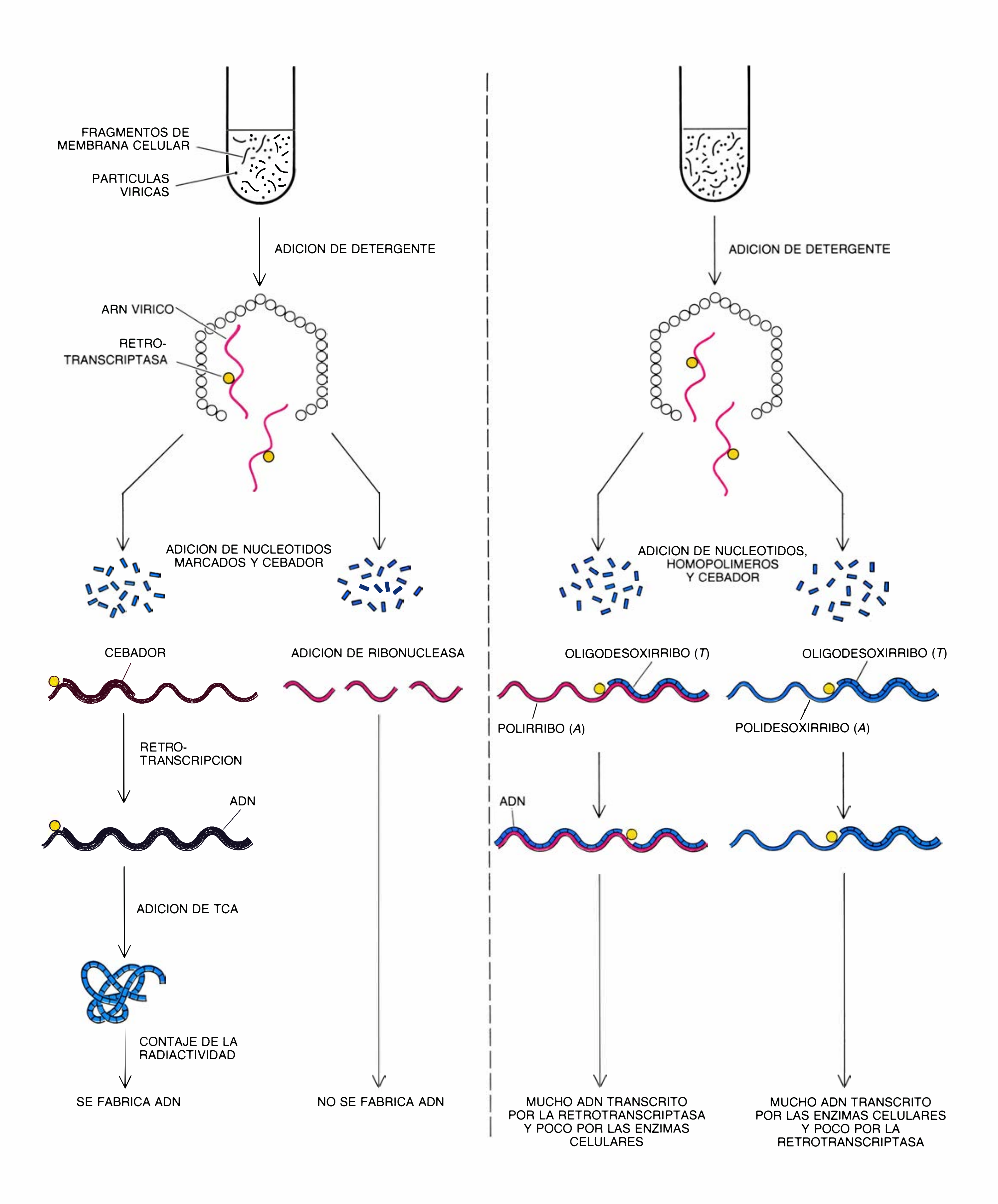


3. PARTICULAS VIRICAS NUEVAS saliendo de un linfocito *T* (aumentado unas 13.000 veces) procedente de un cultivo. Las partículas aparecen como pequeños círculos oscuros en la periferia de la célula. La estructura de forma irregular situada en el centro es el núcleo del linfocito. Las zonas redondeadas son gotas de lípidos. La imagen resulta poco usual, pues el HTLV-I se replica sólo durante una breve etapa del ciclo de vida de la célula *T*. La electromicrografía es obra de Bernhard Kramarsky, de Electro-Nucleonics, Inc.

Empero, ni al autor ni, independientemente, a Sol Spiegelman, de la Universidad de Columbia, les pareció que proseguir la búsqueda fuese inútil. Quizá los retrovirus humanos utilizaran un mecanismo oncogénico diferente, que no tendría por qué ir acompañado de aquella exuberante replicación vírica. Si así fuese, la microscopía electrónica (una vía "grosera" de abordar el problema) nunca detectaría el patógeno. Puede que un ensayo más sensible sí lo lograra, y afortunadamente contábamos con la retrotranscriptasa. Al ser esta enzima específica de retrovirus, su presencia en las células de los tumores denunciaría que también había virus. Además, el ensayo bioquímico que permitía detectar la presencia de actividad retrotranscriptasa (su síntesis de ADN) era mucho más sensible que la microscopía.

Las virtudes del cultivo

Entre 1970 y 1975 nuestros grupos trabajaron sobre el ensayo de la retrotranscriptasa, hasta hacerlo varios órdenes de magnitud más sensible que el de la microscopía electrónica [*véase la figura 4*]. Por medio de esos ensayos obtuvimos resultados que, sin ser definitivos, abrían el camino de la esperanza. A partir de células leucémicas de varios pacientes purificamos polimerasas de ADN que parecían estar dotadas de las propiedades de la retrotranscriptasa. Quedaba, sin embargo, un punto por resolver: esas enzimas po-

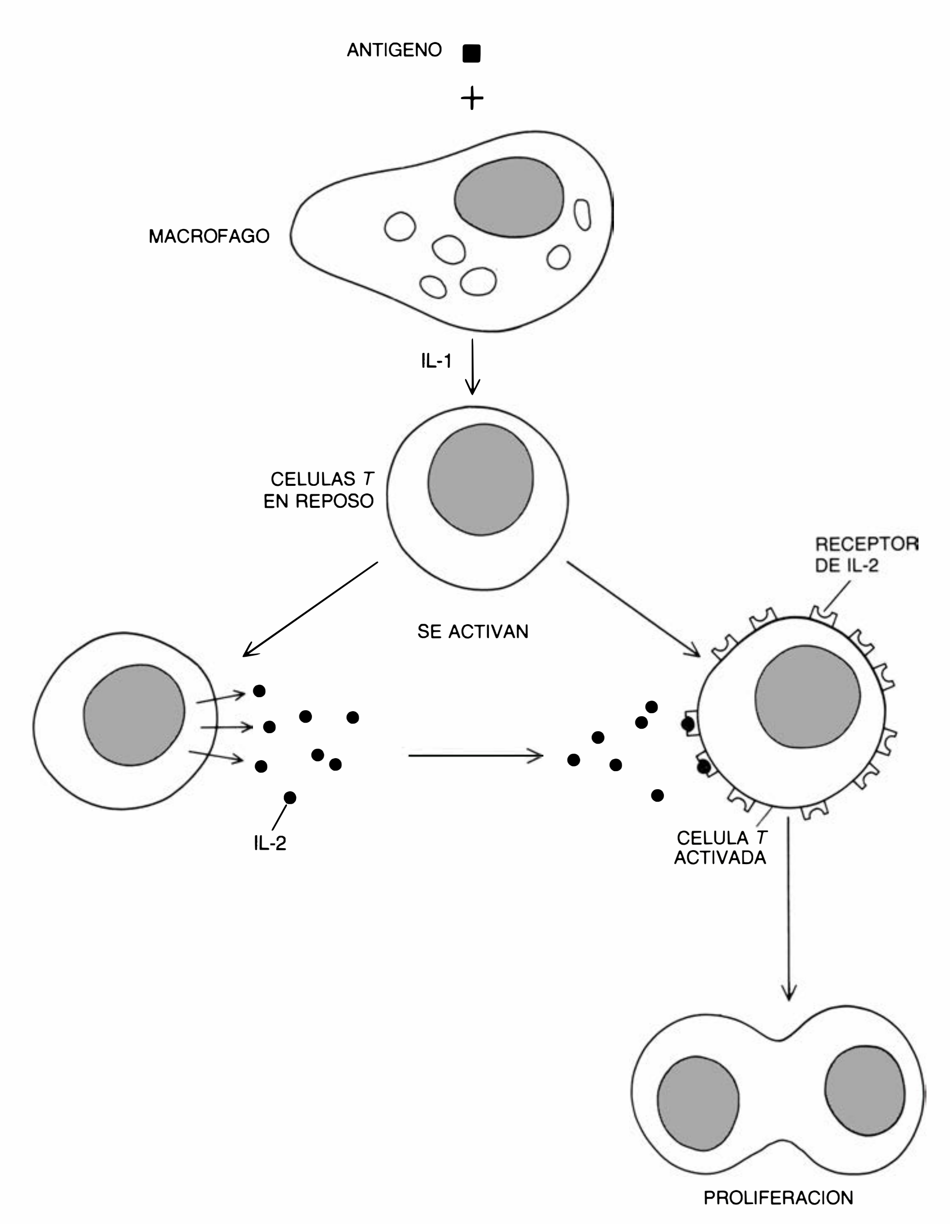


4. ENSAYO DE LA RETROTRANSCRIPTASA, que se basa en la capacidad de esa enzima para fabricar ADN a partir de ARN. En su forma original (*izquierda*), el ensayo utiliza de molde el ARN vírico. Las células infectadas se centrifugan para separar las partículas víricas (y restos de membrana celular) de otros materiales. Con un detergente se rompen las partículas y se libera la retrotranscriptasa. A la solución que contiene la enzima se le añaden nucleótidos marcados radiactivamente y pequeños fragmentos de ADN que actúan de "cebadores" en la síntesis de ADN. La retrotranscriptasa sintetiza ADN, que se precipita con ácido tricloroacético (TCA). La emisión radiactiva del precipitado prueba que los nucleótidos marcados se han incorporado en una molécula de ADN. Si a la solución se le añade ribonucleasa (enzima que degrada el ARN), no se sintetiza ADN, lo que demuestra que el proceso depende de la existencia de un molde de ARN. Posteriormente se modificó el ensayo (*derecha*) y se utilizaron moldes sintéticos, que permiten distinguir la actividad debida a la retrotranscriptasa de la que corresponde a otras enzimas celulares parecidas que se sirven del ADN como molde. Si se emplea como molde polirribo(A), una forma de ARN, la enzima del virus fabrica mucho ADN y las celulares poco. Si se utiliza polidesoxirribo(A), una forma de ADN, se llega a un resultado opuesto.

dían ser polimerasas celulares poco habituales que se hubieran detectado porque la enfermedad había incrementado su presencia. Para determinar de forma inequívoca su origen necesitábamos una cantidad mucho mayor del presunto virus, lo que nos obligaba a cultivar las células infectadas.

El cultivo in vitro de células sanguíneas humanas, normales o cancerosas, resulta extremadamente difícil. De hecho, a principios de la década de 1970 ninguna línea celular de laboratorio se adecuaba a nuestros propósitos. Por entonces, sin embargo, se descubrieron los denominados factores de crecimiento; con esas proteínas se había logrado el cultivo de tipos celulares de tozudez comparable. Parecía razonable, por consiguiente, que los factores de crecimiento constituyeran el instrumento que había de permitir el cultivo de glóbulos blancos. Se inició, pues, la búsqueda de los factores de crecimiento que resultaran más adecuados a nuestros propósitos.

Peter C. Nowell, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Pensylvania, había dado, en la década de 1960, un primer paso en ese sentido. Nowell encontró que una proteína de origen vegetal, la fitohemaglutinina (PHA), instaba un mayor tamaño de ciertos glóbulos blancos y su activación y posterior división una o dos veces. Más tarde se demostraría que las células de Nowell eran células *T*, y su experimento equivalía a un cultivo a corto plazo. Retomando los estudios de Nowell donde éste los dejó, mis colegas Doris Morgan y Francis Ruscetti y yo encontramos, en 1976, que, en efecto, tras estimularlas con PHA, algunas células *T* liberaban un factor de crecimiento. Lo denominamos factor de crecimiento de las células *T*, o TCGF; hoy se conoce por interleucina-2, o IL-2.

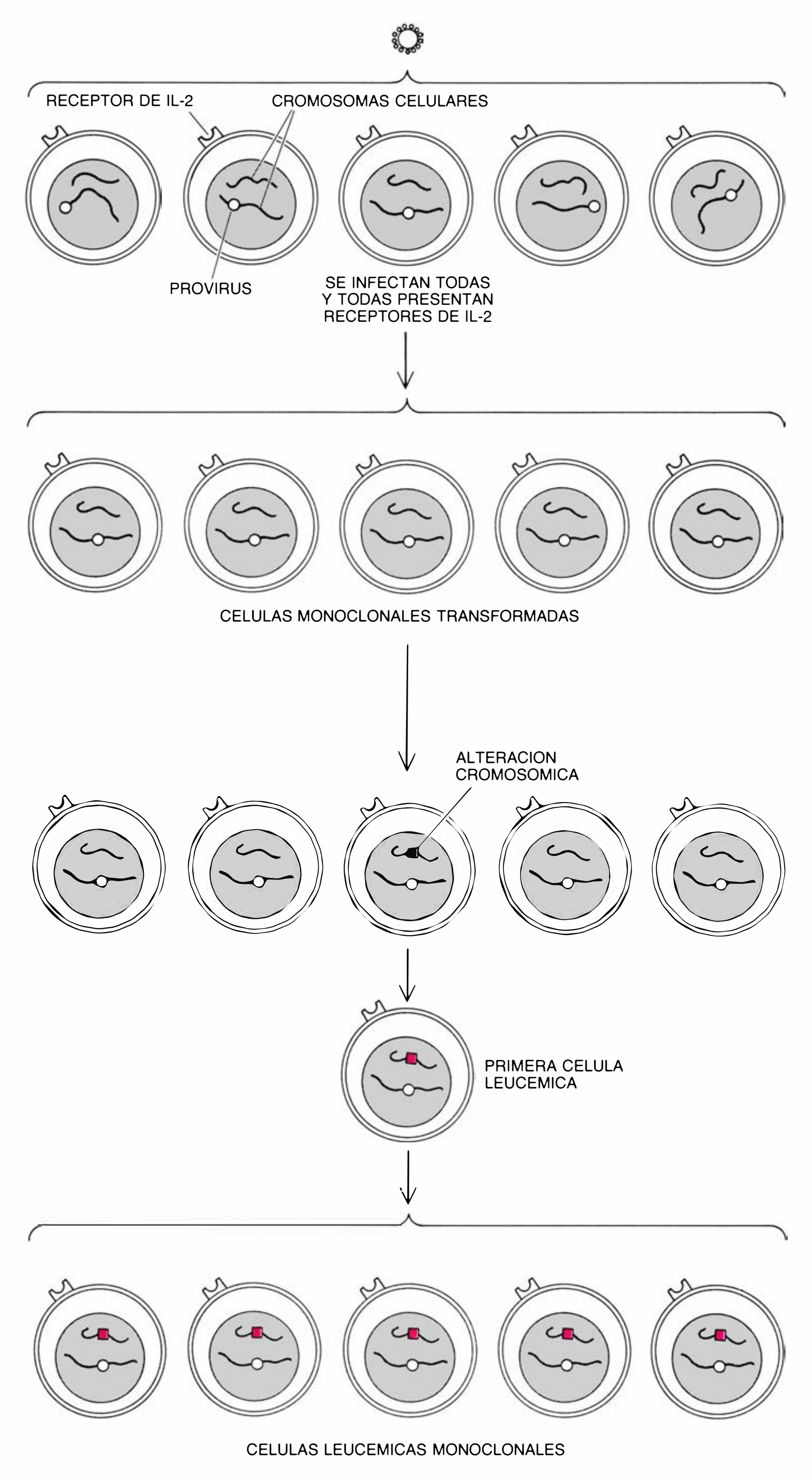


5. LAS CELULAS *T* SE ACTIVAN tras la infección. El proceso comienza cuando un macrófago, un glóbulo blanco, entra en contacto con un antígeno, proteína situada en la superficie del organismo invasor. El macrófago excreta la proteína IL-1. Cuando la IL-1 alcanza a las restantes células *T*, éstas excretan una segunda proteína, la IL-2, y además despliegan sobre su superficie receptores específicos de IL-2. La unión entre IL-2 y sus receptores induce la división y maduración de las células *T* (la adquisición de las características funcionales exigidas por el complejo papel que desempeñan en la respuesta inmunológica). El descubrimiento de que la IL-2 (primero denominado factor de crecimiento de la célula *T*) podía utilizarse para cultivar células *T* in vitro, constituyó una de las etapas cruciales del aislamiento del HTLV-I por parte del autor.

Además de excretar IL-2, las células *T* activadas desarrollaban en su superficie moléculas receptoras de esa misma proteína. Cuando el factor de crecimiento se unía a su receptor, las células comenzaban a dividirse. Habíamos encontrado un procedimiento de cultivo de células *T*; acumulábamos suficiente IL-2 y la añadíamos a las células preestimuladas; así se mantenía el cultivo durante largos períodos. En realidad, ese procedimiento simula lo que ocurre en el sistema inmunológico normal. Las células *T*, que derivan de un precursor de la médula ósea, emigran a la glándula del timo, donde maduran. Allí se diferencian en dos clases, *T*4 y *T*8, que poseen marcadores de superficie y funciones inmunológicas distintas. En respuesta a una infección, algunas de esas células *T* maduras son activadas por una proteína denominada IL-1; luego la IL-2 estimula su división.

A finales de los años setenta, sin embargo, esos procesos apenas se intuían. Más tarde, los estudios inmunológicos, en especial los de Kendall A. Smith y sus colaboradores, de la Facultad de Medicina Dartmouth, y Hans Wigzell, del Instituto Carolino de Estocolmo, demostraron el importante papel que desempeña la IL-2 en el sistema inmunitario. En cualquier caso, nuestro interés no radicaba en la propia respuesta inmunológica, sino en el cultivo de células *T*, y en ello la IL-2 resultaba muy eficaz.

Bernard Poiesz, becario postdoctoral de mi grupo, encontró que algunas células *T* humanas leucémicas podían cultivarse con IL-2 sin necesidad de activarlas previamente con PHA. La función de la PHA consistía en generar receptores de IL-2, de los que carecen las células *T* normales. Aparentemente, las células *T* leucémicas sí presentaban el receptor de la IL-2, de ahí que pudiera prescindirse de su activación. Como veremos, ese sorprendente descubrimiento resultó de gran importancia en el mecanismo oncogénico de HTLV-I. Análisis posteriores de las cé-



6. EL HTLV-I PRODUCE LEUCEMIA tras un complejo proceso. Cuando el virus infecta un grupo de células *T*, todas fabrican receptores específicos de IL-2 y en todas ellas se encuentra posteriormente el provirus (ADN vírico integrado en el genoma celular). En cada célula, sin embargo, el provirus se encuentra en un sitio distinto. Algunas de las células infectadas alcanzan un estado precanceroso, y algunas de éstas forman clones de descendientes, todos los cuales llevan una copia idéntica del ADN de su progenitor, incluido el provirus. En una célula de uno de esos clones, y tras una alteración cromosómica, se puede desencadenar en última instancia el estado canceroso. Todas las células leucémicas descienden de ese ancestro maligno.

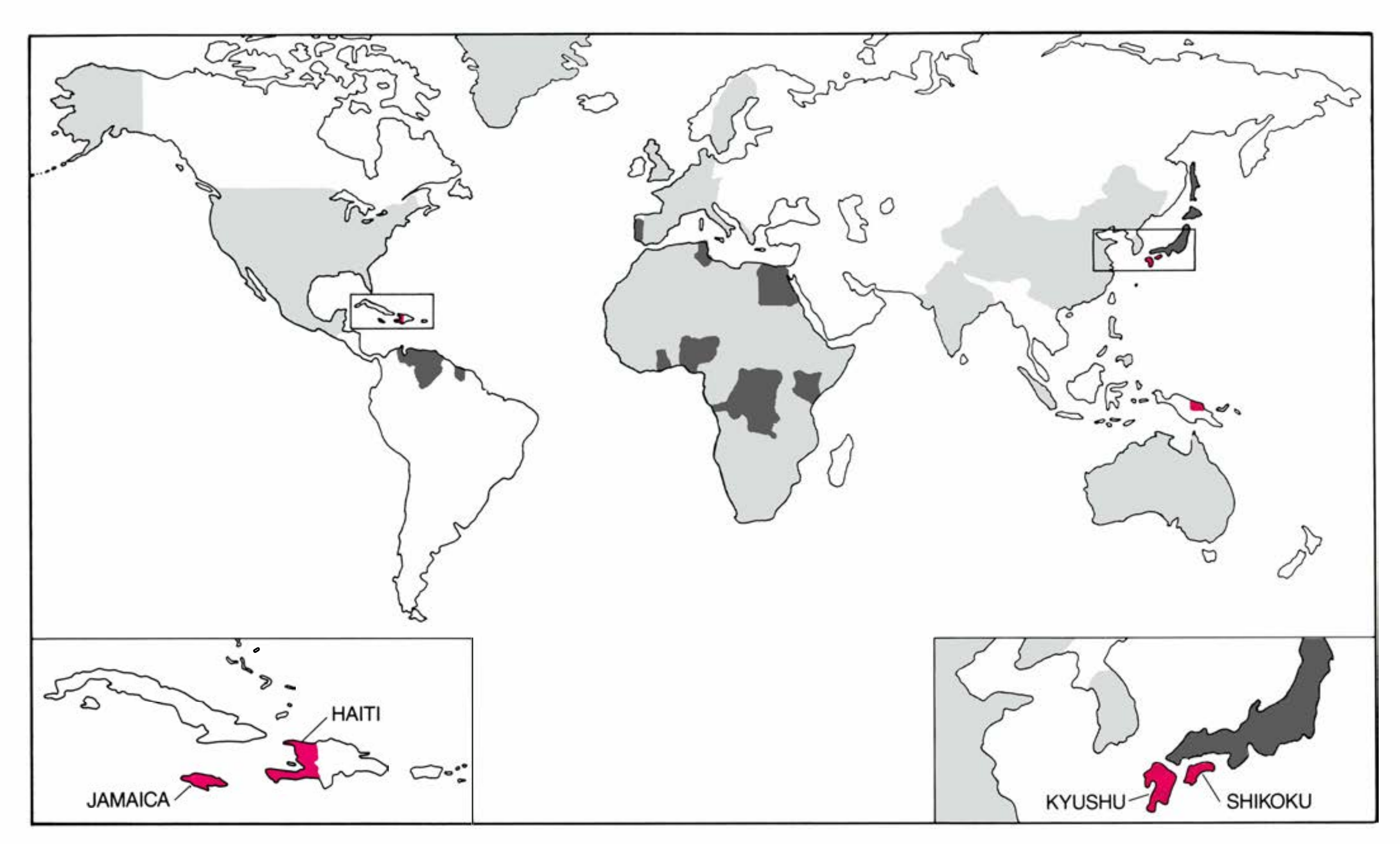
lulas *T* leucémicas revelaron que presentaban cierto grado de maduración y poseían el marcador *T*4.

Los primeros aislamientos

En 1978-79 aislamos los primeros HTLV-I a partir de ese tipo de células, obtenidas de dos pacientes leucémicos. Aislamos el virus, lo caracterizamos y demostramos que se trataba de un virus humano. Nuestros resultados se publicaron en 1980 y principios de 1981. Posteriormente aislamos muchos más. Mi colega Marvin Reitz demostró que esos virus no guardaban parentesco próximo con ningún virus animal conocido. Comprobó, además, que nuestros virus no eran endógenos, sino exógenos y, por tanto, el mismo tipo de agentes que ataca a los animales.

Persistía, sin embargo, cierta confusión en torno a la enfermedad asociada al HTLV-I, ya que al no conocerse con exactitud el origen de las leucemias de células *T*, los médicos estaban obligados a basarse en los síntomas para clasificar las formas de la enfermedad. Los pacientes de donde aislamos el primer HTLV-I presentaban un cáncer de células *T*4 maduras, acompañado de trastornos cutáneos, derivados de infiltraciones de las células malignas. Este cuadro clínico se denominaba micosis fungoides, o leucemia de células *T* de Sézary. Ahora bien, según nuestros estudios, el HTLV-I sólo se detectaba en una pequeña fracción de los pacientes con micosis fungoide o síndrome de Sézary. Y a la inversa, muchos pacientes leucémicos, positivos para la presencia de HTLV-I, no presentaban anormalidades en la piel, por lo que no encajaban en la definición clínica de esas patologías.

Empezó a verse todo un poco más claro cuando nos llegaron noticias de una leucemia adulta de células *T* (ATL), descrita por vez primera por Kiyoshi Takatsuki, de la Universidad de Kyoto. La ATL se parece a la micosis fungoide y al síndrome de Sézary, aunque con algunas diferencias significativas. Por ejemplo, no siempre está afectada la piel. Además, la ATL es más agresiva que las otras formas (la supervivencia media, una vez diagnosticada, es de sólo tres a cuatro meses). Las víctimas, aunque adultos, suelen ser jóvenes, y la presencia de células *T* malignas en la sangre va a menudo acompañada de hipercalcemia (incremento de los niveles de calcio en la sangre). La mera hipercalcemia puede resultar fatal, si bien lo común es que la



7. DISTRIBUCION GLOBAL de los focos de infección del HTLV-I, cuyo estudio aporta algunas claves sobre el origen del virus. Las principales áreas endémicas del virus (*color*) son la cuenca caribeña y el suroeste del Japón. Otra posible área endémica, aún sin confirmar, sería Nueva Guinea. Entre las zonas con niveles intermedios de infección (*gris oscuro*) se cuentan algunas del Africa ecuatorial e Iberoamérica. En otras áreas (*gris claro*) existen focos débiles de infección. No se dispone de datos epidemiológicos de muchas zonas (*blanco*). El descubrimiento de virus extraordinariamente parecidos al HTLV-I en ciertas especies de monos africanos sugiere que el virus pudo originarse en Africa y transmitirse al resto del mundo a través de rutas comerciales, principalmente de tráfico de esclavos. Los datos que ofrece el mapa los recopiló William A. Blattner, en colaboración con Carl Saxinger, Marjorie Robert-Guroff y el autor.

muerte se deba a la gran proliferación de células leucémicas, o a infecciones oportunistas.

Geografía del virus

Takatsuki y sus colaboradores observaron que la ATL era extraordinariamente frecuente en Kyushu y Shikoku, las dos grandes islas más meridionales del Japón. Tal concentración sugería que la enfermedad podía deberse a un agente infeccioso. Los síntomas eran parecidos a los casos producidos por el HTLV-I, de ahí que decidiéramos comprobar, con Yohei Ito, de la Universidad de Kyoto, si los pacientes afectados de ATL también eran portadores del virus. Y así ocurría. El suero sanguíneo de todos los pacientes analizados contenía anticuerpos que reaccionaban con el HTLV-I. Es más, los anticuerpos monoclonales (preparaciones de anticuerpos específicos que reaccionan con una sola proteína) contra las proteínas HTLV-I reaccionaban con las células ATL, pero no con las normales. Parecía como si el HTLV-I fuese el agente causante de la ATL.

En un seminario sobre virus celebrado en Kyoto, en marzo de 1981, al que presenté nuestros primeros resultados, se discutieron algunos trabajos que apoyaban nuestras conclusiones. Yorio Hinuma, de la Universidad de Kyoto, describió la existencia de una línea de células ATL (desarrollada por Isao Miyoshi, de la Universidad de Kochi), que, cuando se cultivaba en el laboratorio, liberaba partículas de virus. Todos los datos disponibles indicaban que el virus procedente de las células del cultivo de Miyoshi era idéntico al HTLV-I.

Poco tiempo después se resolvió la duda. Mitsuaki Yoshida, del Instituto Nacional del Cáncer de Tokyo, publicó la secuencia de nucleótidos del genoma de ARN del virus aislado en Japón, y la comparó con la secuencia del HTLV-I. El solapamiento era tan evidente que no había duda de que los virus americano y japonés eran versiones extraordinariamente parecidas del mismo agente. Barton Haynes y Dani Bolognesi, del Hospital Clínico de la Universidad de Duke, confirmaron posteriormente, de forma independiente, la presencia de HTLV-I en los Estados Unidos. Aislaron el virus en un paciente americano de origen japonés que presentaba una leucemia de células *T*.

La concentración de casos de ATL en el sur del Japón había ayudado de modo significativo a establecer una relación entre el HTLV-I y una enfermedad específica. De ahí que intentáramos hallar pautas similares en otros lugares. Hasta 1980, sin embargo, nuestros trabajos epidemiológicos se vieron frenados por la ausencia de focos claros de la enfermedad en los Estados Unidos. El único dato epidemiológico sobresaliente era que la mayoría de nuestros pacientes eran negros nacidos en los Estados Unidos, el Caribe o América del Sur. Así las cosas, en 1981, Daniel Catovsky, del Hospital Hammersmith de Londres, señaló la presencia en esa ciudad de un foco de leucemias de células *T* entre los negros nacidos en el Caribe. Sus características clínicas eran notablemente similares a las de los casos norteamericanos y japoneses, en los que se había detectado la presencia del HTLV-I. Como esperábamos, en todos los casos analizados en Londres se detectó también el HTLV-I.

Los datos de Catovsky resultaron de-

cisivos para resolver el rompecabezas de la epidemiología internacional del HTLV-I. Con la formidable cooperación de William A. Blattner, del Instituto Nacional del Cáncer, mis colegas Carl Saxinger y Marjorie Robert-Guroff y yo empezamos un examen de poblaciones negras de los Estados Unidos, el Caribe, América del Sur y Africa, para detectar infecciones del HTLV-I. Se encontró que el HTLV-I no sólo era endémico en las islas meridionales del Japón, sino también en ciertas partes de los Estados Unidos, la mayor parte del Caribe, la porción septentrional de América del Sur y, sobre todo, en Africa.

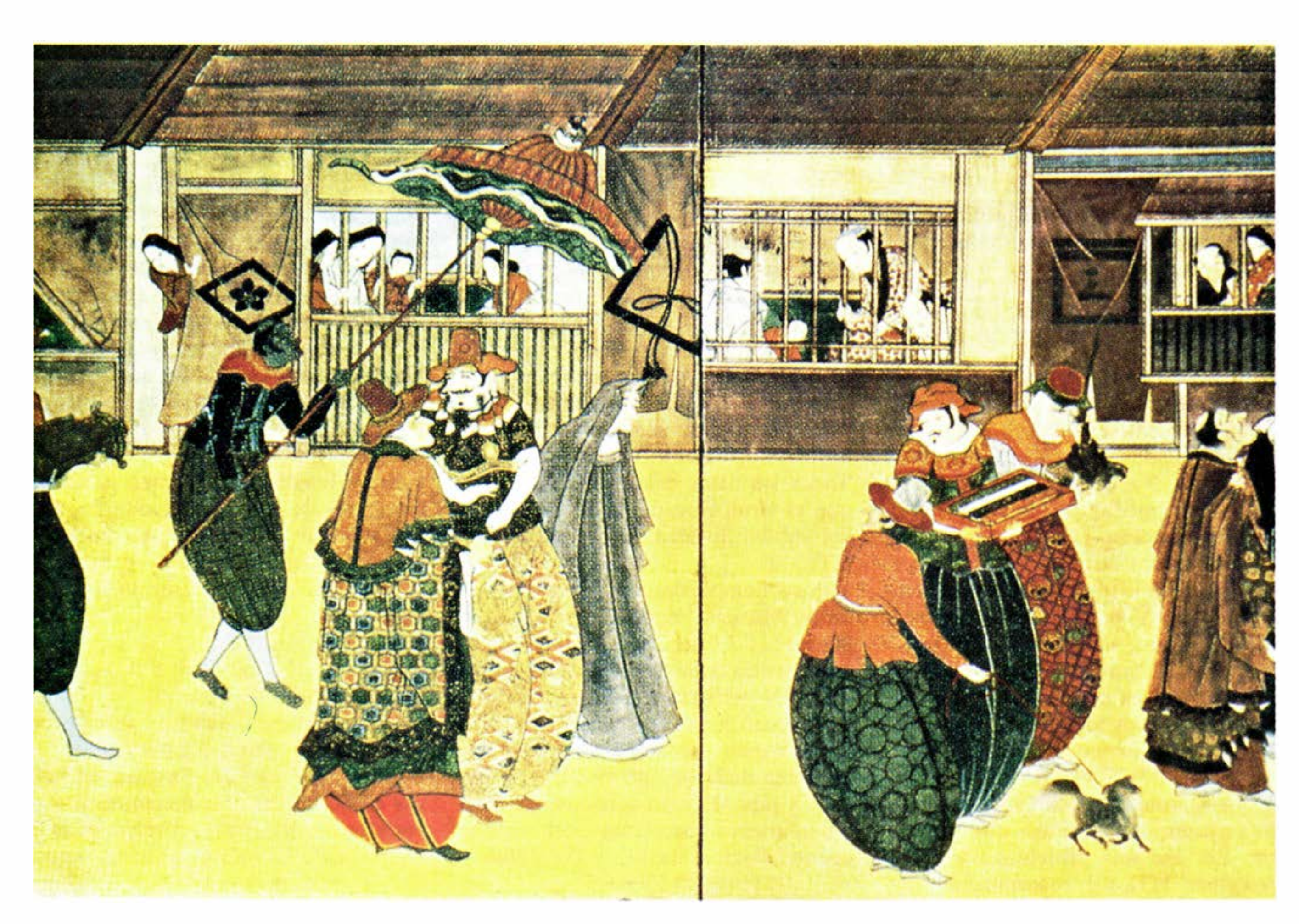
Comercio y cáncer

¿Qué nexo unía esas regiones tan alejadas? Todos los indicios apuntan al mercado de esclavos. Miyoshi descubrió que algunos macacos japoneses poseían anticuerpos contra el HTLV-I, lo que le hizo especular sobre la posibilidad de que, a través de esos monos, el virus hubiera infectado a los nativos japoneses. Hipótesis que se demostró falsa, pues los virus de los macacos japoneses eran suficientemente distintos de los HTLV-I para descartar la transmisión directa. Sin embargo, en trabajos de confirmación de los resultados de Miyoshi, Gebhard Hunsman, de la Universidad de Gotinga, y mi grupo, encontraron que muchas especies de monos africanos llevaban igualmente anticuerpos que reaccionaban con el HTLV-I. Aun siendo agentes distintos, los virus aislados de esos monos estaban también emparentados con el HTLV-I.

Algunos de los virus africanos, en especial los procedentes de los monos verdes y chimpancés, se parecían mucho más al HTLV-I que el virus del macaco japonés. La semejanza bastaba para aventurar que las infecciones de esas especies y la del hombre guardaran alguna relación. Basándome en resultados de ese tipo, los datos epidemiológicos y alguna información histórica, propuse que el HTLV-I se originó en Africa, donde infectó a muchas especies de primates del Viejo Mundo, hombre incluido, y llegó a América siguiendo el comercio de esclavos.

Curiosamente, quizá entrara en Japón por la misma vía. En el siglo XVI arribaron allí comerciantes portugueses, que se detuvieron específicamente en las islas donde ahora es endémico el HTLV-I. Con ellos iban esclavos africanos y monos, según recogen ilustraciones japonesas de la época. Cualquiera de ellos pudo ser portador del virus. Choca con esa hipótesis el reciente descubrimiento de que la infección por HTLV-I es común entre los Ainu, que viven en Hokkaido, la isla más septentrional del Japón, donde nunca llegaron los portugueses. Por ahora, no obstante, sigue constituyendo una explicación plausible del patrón global de dispersión del virus.

Los descubrimientos epidemiológicos relativos al HTLV-I no sólo aclaraban el patrón global de dispersión, sino también su distribución en áreas menores, e incluso el modo de trans-



8. COMERCIANTES PORTUGUESES pudieron introducir el HTLV-I en el Japón, a través de los esclavos africanos o los monos que solían acompañarles en sus viajes. Durante el siglo XVI, los navegantes portugueses realizaron muchos viajes a esas islas de Oriente. La ilustración muestra un dibujo japonés de la época, que representa una de esas visitas. La figura de la izquierda es un africano que porta un baldaquín sobre dos comerciantes portugueses enfrascados en animada conversación. El contacto con los portugueses se concentró en las islas más meridionales del Japón. En 1978 se identificó en esa misma región un nuevo tipo de afección maligna de células *T*. Dicha enfermedad, la denominada leucemia adulta de células *T*, o ATL, guarda una relación muy estrecha con el HTLV-I.

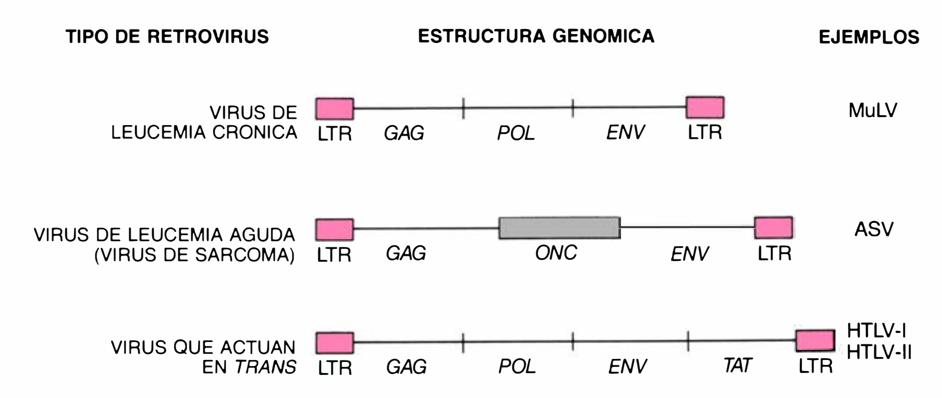
misión del virus entre personas. Resultó fácil establecer la relación entre HTLV-I y ATL gracias a la localización del agente, mayor que la de otros, y a la correspondencia entre virus y enfermedad, notable: donde se encuentra un foco de ATL abunda el virus, y viceversa. Lo que no empece que, en áreas geográficas pequeñas, en los pueblos, por ejemplo, la incidencia de la infección sea muy variable.

Esa gran variación en áreas pequeñas (sumada a otros datos) demuestra que el HTLV-I no se transmite de forma casual. Se han podido trazar varias rutas de infección; todas demandan un estrecho contacto. El virus puede transmitirse por transfusión de sangre contaminada o entre drogadictos que compartan una jeringuilla. Se transmite también por contacto sexual, tanto homosexual como heterosexual. Puede infectarse el feto en el útero si la madre es portadora del virus. Observaciones recientes, realizadas en Japón, sugieren que a los niños puede llegarles el HTLV-I a través de la leche materna. Descubrimientos aún más recientes indican que los propios mosquitos vehiculan el virus. Tras la infección, el agente entra en una fase de latencia que puede prolongarse durante 40 años (si la infección ha ocurrido en la infancia) o unos pocos años (si se ha producido en edad adulta).

La causa directa

¿Qué relación existe entre la infección original y el tumor, que quizá se desarrolle 40 años más tarde? Según parece, el virus desempeña un papel bastante directo. Así lo sugieren, por ejemplo, los estudios epidemiológicos. Los niños infectados, nacidos en zonas endémicas del sur de Japón, tienen la misma probabilidad de contraer la ATL con independencia de que pasen allí el resto de su vida o emigren a otra parte del mundo a edad temprana. Lo mismo resulta ser cierto en otras áreas endémicas. Al parecer, el virus puede desencadenar por sí solo la cascada entera de acontecimientos que determinan la manifestación del tumor, sin necesidad de que intervenga algún factor ambiental propio del medio donde se da el endemismo.

Los estudios de tipo molecular apuntan también en ese sentido. Cuando el HTLV-I infecta células *T* de laboratorio, el provirus se integra en el genoma celular de forma aleatoria. En unas células se integra en el cromosoma 5, en otras en el 8 y en otras terceras puede hacerlo en el 15. No obstante, cuando se analizan las células de un paciente con ATL, la secuencia vírica se encuentra siempre en el mismo sitio en todas las células del tumor, señal de que el tumor es un clon, y que todas sus células derivan de una misma: todas contienen copias del genoma del progenitor. Ello indica, además, que la infección precedió a la formación del tumor, ya que si el virus hubiese entrado en las células de un tumor ya formado, la secuencia vírica ocuparía sitios distintos en cada célula tumoral.



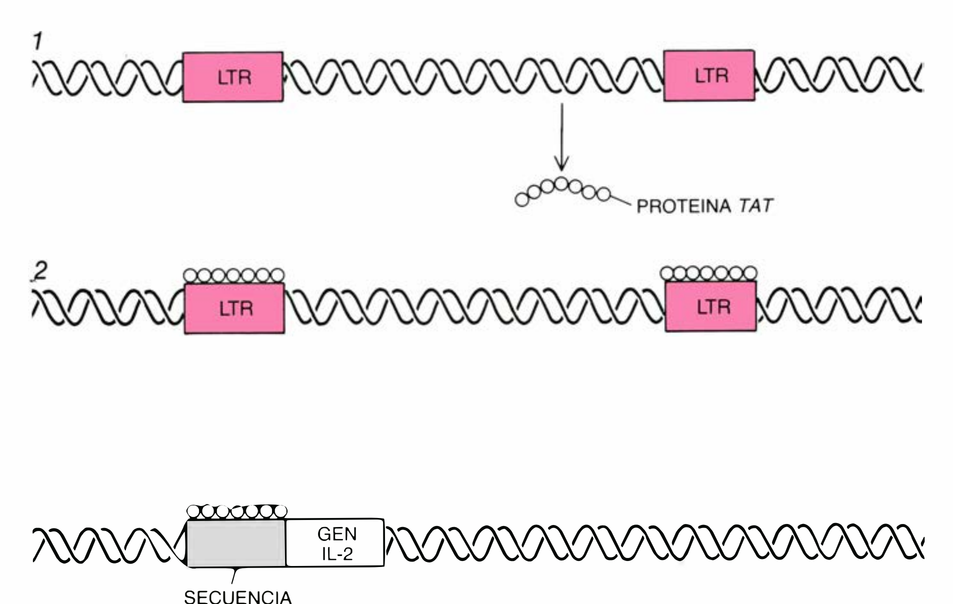
9. RETROVIRUS QUE PRODUCEN LEUCEMIA; pueden clasificarse en tres grupos, atendiendo a su estructura genética y mecanismo patogénico. El genoma básico del retrovirus incluye secuencias de ADN que determinan las proteínas que se encuentran en el "núcleo" del virus, la retrotranscriptasa y las proteínas de la envuelta; son, respectivamente, las secuencias *gag, pol* y *env*. Los virus que causan leucemia crónica, como el virus de la leucemia del ratón (MuLV), poseen sólo esos tres tipos de secuencias. Los virus que causan leucemias agudas, o virus del sarcoma, poseen otra secuencia más de ADN, el gen *onc*, implicado en la regulación del crecimiento celular. Entre los virus del sarcoma se cuenta el del sarcoma de aves (ASV). En el tercer grupo, el de los virus que actúan en *trans*, se incluyen el HTLV-I y su pariente HTLV-II. Este último grupo se caracteriza por la presencia de un gen llamado *tat*. (Los dibujos son obra de George V. Kelvin.)

Ello no es todo. Cuando Miyoshi cultivó células ATL con sangre de cordón umbilical humano, las células *T* del bebé (normal) se tornaron inmortales y se transformaron en precancerosas. Todo apuntaba a que algunas partículas víricas escapadas de las células leucémicas habían transformado las normales. Así se demostró posteriormente de forma inequívoca en mi laboratorio, en experimentos comenzados por Mika Popovic y continuados por Zaki Salahuddin y Philip Markham. Comprobaron que muchos de los HTLV-I aislados podían transformar células *T*4 en sólo cinco o siete semanas. El provirus presente en las células transformadas se integraba de modo similar al observado en las células ATL. Miyoshi cerró el círculo: tomó células transformadas en el laboratorio, las inoculó en hámsters y comprobó su carácter tumorígeno.

Asociar el HTLV-I a un cáncer constituía un logro muy satisfactorio, pero ahí no acababa la empresa. Antes bien, era el punto de partida del siguiente objetivo: identificar el mecanismo molecular mediante el cual el virus producía la leucemia. Aunque el proyecto está aún inconcluso, a partir del trabajo ya realizado puede dibujarse a grandes rasgos el mecanismo patogénico. El examen del patrón de integración del provirus en el genoma celular ha aportado información decisiva (trabajo que realizaron mis colegas Flossie Wong-Staal, Beatrice Hahn y Vittorio Manzari, e, independientemente, Motoharu Seiki, del Instituto del Cáncer de Tokyo, que trabajaba con Yoshida). Como mencioné anteriormente, en las células tumorales el provirus se integra de forma clonal. De un paciente con ATL a otro, sin embargo, no se observa uniformidad, ya que cada uno tiene localizada la secuencia vírica en un sitio diferente.

Un mecanismo nuevo

La conjunción de esas dos circunstancias, integración aleatoria entre tumores y el carácter clonal de dicha integración, sugiere de inmediato que el HTLV-I debe provocar la leucemia valiéndose de un mecanismo nuevo. Sólo se conocían entonces dos mecanismos de inducción de leucemia por parte de retrovirus, que definían dos grupos víricos distintos. Uno de ellos se basaba en la presencia, en el genoma del agente, de un gen *onc*, gen celular implicado en la regulación del crecimiento. La expresión del gen *onc* transformaba todas las células infectadas, desarrollándose un cáncer de crecimiento rápido, no monoclonal pues procedía de muchos progenitores. Comparten el mecanismo una serie de virus que causan leucemias agudas y sarcomas (entre los que se cuenta el virus del sarcoma de aves aislado por Rous). Combinar en una sola secuencia ADN celular y vírico precisa, no obs-



10. PROTEINA TAT, que desempeña un papel decisivo tanto en la replicación del HTLV-I como en la transformación de la célula hospedadora en cancerosa. El gen *tat* está situado cerca de uno de los extremos del provirus (integrado en el cromosoma hospedador), próximo al fragmento de ADN denominado LTR, o secuencia terminal redundante (*1*). Las LTR regulan la actividad de otros genes víricos. La proteína puede contribuir al control de la tasa de replicación vírica, uniéndose a las LTR (*2*). Si se enlaza a ciertas secuencias reguladoras celulares (por ejemplo, las que controlan los genes de la IL-2 y su receptor), puede instar a la célula hospedadora a proliferar anormalmente, lo que quizá constituya el primer paso de la carcinogénesis.

tante, que se produzcan ciertos procesos genéticos poco frecuentes, de ahí la escasa incidencia de esos virus.

Mucho más comunes son los virus causantes de la leucemia crónica, entre los que recordaremos el virus de la leucemia de aves (ALV) y el de la leucemia de ratón (MuLV). Carecen de genes *onc* y provocan enfermedades mucho más parecidas a las humanas: sólo una minoría de los animales infectados desarrollan leucemia; ésta aparece al cabo de un largo período de latencia y los tumores son clonales. Existe, no obstante, una diferencia crítica entre su forma de actuar y la del HTLV-I. Para que esos virus produzcan la enfermedad, es obligado que el provirus se integre en un sitio específico, lo que permite que ciertas secuencias reguladoras del ADN vírico interactúen con genes celulares cercanos que estimulan la proliferación celular. Por el contrario, parece que el carácter patogénico de HTLV-I es independiente del lugar donde se integre el provirus.

Además de orientar las futuras investigaciones, las discrepancias entre el virus de la leucemia crónica y el HTLV-I ayudaron a resolver un viejo enigma. Como cité antes, la imposibilidad de detectar al microscopio electrónico partículas víricas en las células de tumores humanos constituía uno de los argumentos que ponían en entredicho el hipotético hallazgo de retrovirus humanos. A medida que se esclarecía el mecanismo de actuación del HTLV-I se aventuraba una posible razón de la escasez de virus en las células cancerosas. El HTLV-I desencadena los acontecimientos que conducen a la formación de un tumor integrándose en cualquier parte del genoma celular, por lo que le bastan unas pocas partículas víricas. Por el contrario, el mecanismo de actuación del virus de la leucemia crónica depende de la integración en un sitio específico; se asegurará de que al menos una copia del provirus alcanza el lugar correcto multiplicándose repetidamente.

Acción a distancia

Existen, así pues, importantes diferencias entre el modo de acción de ambos tipos de virus. En última instancia, no obstante, se da por sentado que los dos afectan a la actividad de genes celulares que controlan la proliferación. El virus de la leucemia crónica lo consigue situándose cerca de esas secuencias celulares. El provirus del HTLV-I puede integrarse en cualquier sitio. Si actúa sobre genes que controlan el crecimiento, debe hacerlo a distancia. Los biólogos moleculares denominan a ese mecanismo "actuación en *trans*". ¿Cómo actúa en *trans* el HTLV-I?

Los primeros indicios sobre el modo de acción del HTLV-I se encuentran en unos trabajos de Seiki y Yoshida. Al estudiar la secuencia de nucleótidos de un provirus descubrieron una región, nueva entre los retrovirus conocidos, a la que llamaron *X*. Observaron que la región *X* podía, en potencia, determinar la síntesis de cuatro proteínas. Al poco tiempo, Wong-Staal y mi colega George Shaw, en colaboración con William Haseltine, del Instituto del Cáncer Dana-Faber, identificaron un segmento de *X* que resultó ser el gen que determinaba una de esas cuatro proteínas. Al gen, común a todos los HTLV-I aislados, se le llamó *tat* (por activación a través de una acción en *trans*). Se ha demostrado ya que la proteína determinada por el gen *tat* es esencial para que el virus ejerza su capacidad transformante en cultivos.

Los primeros tanteos en el cultivo de células *T* dieron una pista de la posible función de *tat*. Como ha quedado dicho, habíamos descubierto que algunas células *T* malignas podían cultivarse con IL-2, sin necesidad de activarlas previamente. En circunstancias normales, el nivel basal de IL-2 en el organismo es muy bajo y los genes que determinan sus receptores están inactivos. Nuestros experimentos sugerían, sin embargo, que, en las células malignas, los genes de IL-2 podían hallarse permanentemente activos. No hace mucho, mi colega Warner Greene encontró que, tras insertar el gen *tat* en células *T* humanas, éstas, además de fabricar IL-2, elaboraban también sus receptores. Resulta verosímil, por tanto, que uno de los primeros procesos de la transformación sea la inducción, por parte del gen *tat*, de IL-2 y de sus receptores. Una vez inducidas, las células crecerían anormalmente.

La vía que lleva al cáncer debe constar, no obstante, de otros pasos más, ya que cuando, en un paciente, se manifiesta la enfermedad ATL, las células leucémicas no fabrican ni necesitan IL-2. Además, cuando se ha contraído la leucemia, en las células del tumor no se expresa ningún gen vírico, ni siquiera el *tat*, al menos en niveles detectables. Puede que, tras arrancar la transformación por obra de *tat*, se registre una gran proliferación de las células infectadas. Para que algunas de esas células alcancen finalmente el estado canceroso se requiere un segundo (y quizás un tercer) proceso genético.

Curiosamente, el producto del gen *tat* está implicado en la replicación del virus y en la iniciación del cáncer. En los dos extremos de la secuencia de ADN del provirus existe un largo frag-

mento que se repite, el denominado LTR (por *l*ong *t*erminal *r*epeat). El LTR contiene secuencias que regulan la expresión de los genes víricos y que, por tanto, determinan la tasa de síntesis de los componentes del virus (ARN y proteínas). La interacción de la proteína *tat* con alguna de esas secuencias reguladoras quizás inste el rápido incremento de la producción de nuevas partículas de virus. Ello resultaría de enorme utilidad para HTLV-I que, al replicarse únicamente durante cierto lapso del ciclo de vida de la célula (cuando se activa la célula *T*), probablemente necesite aprovechar al máximo esa "ventana".

Otras vías

Este es, de momento, el breve resumen de lo que se sabe sobre el mecanismo molecular de acción del HTLV-I. Aunque los trabajos siguen por ese camino, se están abriendo nuevas vías de investigación. Unas tienen que ver con el estudio de las enfermedades que guardan una estrecha relación con el virus. El HTLV-I, además de ser la causa directa del cáncer de células *T* en adultos, quizás intervenga indirectamente en otras enfermedades.

Según Essex, por ejemplo, las personas infectadas con el virus son más propensas a contraer otras infecciones, por la presumible razón de que algunas de las células *T* infectadas, pero no transformadas, carezcan de plenitud funcional. Esas células *T* "normales" infectadas podrían contribuir también a las leucemias de otros tipos de glóbulos blancos, los linfocitos *B*, observadas en algunos pacientes procedentes de las áreas endémicas del Caribe. (La relación entre células *T* infectadas y leucemia de las células *B* podría facilitar la interpretación de la patogénesis de las leucemias.) Finalmente, se ha demostrado hace poco que el HTLV-I está implicado en una enfermedad neurológica parecida a la esclerosis múltiple crónica. Todo apunta a que el impacto real del HTLV-I sobre la salud pública dista mucho de haberse valorado en su justa medida.

Se están realizando también trabajos de investigación sobre el HTLV-II, el segundo retrovirus humano, descubierto en 1982 por mi grupo en colaboración con David W. Golde, de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en Los Angeles. Se aisló por primera vez a partir de una línea de células *T* procedente de un joven blanco que presentaba una variante de una enfermedad conocida como leucemia de células pilosas. El HTLV-II ofrece ligeras diferencias respecto de sus parientes, tanto en la forma como en la función, y está asociado a leucemias de células *T* menos graves. En sus rasgos generales, sin embargo, los dos virus son muy parecidos (como demostraron Golde y su colega Irvin Chen, así como Wong-Staal y Edward Gelman). HTLV-I y HTLV-II poseen, en general, la misma estructura genómica, y sus secuencias nucleotídicas revelan una extraordina semejanza. Tienen, además, la misma capacidad para transformar células en cultivo y ambos presentan idéntico mecanismo de actuación en *trans*. En el nuevo virus se ha encontrado, asimismo, un producto génico similar al *tat*, que se ha denominado *tat* II.

Las enfermedades producidas por los virus HTLV-I y HTLV-II son (salvo en las áreas endémicas) bastante raras. Puede que esa situación no se mantenga indefinidamente. Existen pruebas de que ambos virus se están propagando en algunas poblaciones con alto riesgo de infección, especialmente entre los que se administran droga por vía intravenosa. Alarmada por tales descubrimientos, la Cruz Roja está sopesando la conveniencia de someter a ensayo toda la sangre obtenida de donantes para detectar la presencia del virus, como ya se hace con el HTLV-III.

La importancia del método

La información, cada vez mayor, sobre el primer retrovirus humano, es fruto de una investigación que comenzó hacia 1910. En esa larga historia destaca un momento decisivo: el aislamiento de HTLV-I y su asociación con el cáncer. Para lograrlo se requirieron dos cosas. En primer lugar, un ensayo sensible de detección del virus, obtenido gracias al descubrimiento de la retrotranscriptasa. En segundo lugar, desarrollar la puesta a punto de un método de cultivo de células *T* en el laboratorio. Sin cultivos de células *T* no se podía analizar la sangre, ni fabricar anticuerpos monoclonales con fines epidemiológicos, ni se hubiera contado con el ADN necesario para estudiar el mecanismo molecular de los virus. Todas esas técnicas constituyen los cimientos de una metodología cuya importancia se ha puesto de manifiesto cuando el mundo se ha visto sacudido por la primera gran epidemia de la segunda mitad del siglo xx, el síndrome de inmunodeficiencia adquirida.

Arquitectura funcional de la retina

Docenas de tipos celulares se han especializado en la codificación del mundo visual. Nuevas técnicas permiten ahora el estudio de la disposición e interconexiones de esas poblaciones celulares

Richard H. Masland

La retina codifica el mundo visual. Transforma las imágenes ópticas en series de impulsos nerviosos, que inmediatamente se envían al cerebro a través del nervio óptico. En el cerebro, esas señales se interpretan y configuran la percepción visual: una sensación subjetiva de las formas, colores y movimientos que rodean al observador. Sin embargo, la retina no es un mero depósito de fotocélulas. Esa fina lámina de tejido nervioso situada en el fondo del ojo constituye una prolongación del sistema nervioso central. Sus circuitos de neuronas, o células nerviosas, efectúan una especie de análisis de la imagen visual: se acentúan ciertas características y se mitigan otras.

Durante muchos años, los neurobiólogos se han esforzado en revelar cómo se transforman las señales luminosas en actividad nerviosa y cómo se modifica esa actividad. En primer lugar se demostró el carácter codificador de la retina, es decir, el modo en que se relaciona la imagen visual, su entrada, con la señal que transmite. A principios de la década de 1970 se desentrañaron los rasgos fundamentales del proceso de codificación. Se conocía ya la presencia, en la retina, de cinco clases de neuronas principales, conectadas entre sí a través de sinapsis: zonas de estrecha aposición donde una neurona libera mensajeros químicos, denominados neurotransmisores, que influyen sobre la neurona contigua. Tres de los cinco tipos de neuronas retinianas forman una vía directa desde la retina hasta el cerebro. Se trata de las células fotorreceptoras (los conos y bastones), las células bipolares y las células ganglionares. Los otros dos tipos neuronales, las células amacrinas y las células horizontales, configuran vías laterales que modifican y controlan el mensaje que portan las vías directas.

Hasta hace poco se creía que esos cinco tipos celulares se correspondían exactamente con los elementos funcionales básicos de la retina. Parecía que cada célula desarrollaba una única función específica; para conocer los códigos internos de funcionamiento de la retina, a los neurobiólogos les bastaría con descifrar las interrelaciones existentes entre esos elementos básicos, relativamente escasos. Resulta hoy evidente, por el contrario, que la retina no posee sólo cinco elementos funcionales, sino muchos más. Aquellos cinco tipos celulares presentan, a su vez, subtipos con características propias, y el número real de elementos funcionales distintos bien pudiera alcanzar la cincuentena.

Así, la primera tarea habrá de ser la búsqueda de la razón por la cual resultan necesarios tantos tipos celulares distintos. El trabajo está aún lejos de haberse completado, pero en los últimos años se han realizado importantes progresos en ese sentido. El desarrollo de métodos para observar la disposición de poblaciones enteras de células nerviosas en la retina ha supuesto un avance significativo en esa área de investigación.

De 1952 datan los primeros indicios sobre el proceso de codificación de la información visual en la retina de los mamíferos; derivaron de una serie de experimentos con células ganglionares, cuyos axones constituyen el nervio óptico. Esos experimentos iniciales, llevados a cabo por Stephen W. Kuffler en la Facultad de Medicina de la Universidad Johns Hopkins, pretendían resolver cómo cambia la actividad eléctrica de las células ganglionares en respuesta al estímulo luminoso. Kuffler registró la actividad eléctrica de células ganglionares aisladas. Descubrió que, en su mayoría, transmitían por los axones una corriente continua de potenciales de acción, es decir, de impulsos nerviosos, y ello incluso en ausencia de estímulo luminoso. La célula ganglionar respondía a la presencia de la luz aumentando o disminuyendo considerablemente su ritmo de disparo.

Kuffler estimuló selectivamente regiones específicas de la superficie de la retina en gatos anestesiados: proyectaba pequeños puntos luminosos y medía la respuesta eléctrica de células individuales. Descubrió así que cada célula ganglionar respondía al estímulo de un área precisa del campo visual, lo que se denominó su campo receptor. El tamaño de dicho campo variaba, pero solía ser bastante pequeño. En el caso del gato, las zonas centrales de los campos receptores menores ocupan una extensión retiniana de unos 120 micrometros (la milésima parte del milímetro) de diámetro. Cuando un gato mira hacia una pared que dista dos metros, cada célula ganglionar recoge la información de un área de alrededor de un centímetro de diámetro.

Las células que estudió Kuffler pueden dividirse en dos poblaciones diferentes: las que se excitan y las que se inhiben cuando se estimula el centro de su campo receptor. Es más, el centro actúa en oposición a la región que lo rodea, es decir, la periferia. Si la estimulación del centro del campo receptor excita a la célula, la estimulación de la periferia de dicho campo la inhibe. Y a la inversa, si la luz inhibe la zona central, excita la periférica. En otras palabras, la periferia actúa de "antagonista"; de ese modo, la célula desarrolla un proceso elemental de intensificación por contraste.

Pronto se identificó una célula ganglionar de muy diferente tipo: la célula selectiva direccional, cuyo campo receptor es sensible a la dirección de un estímulo en movimiento. (Se descubri-



1. RETINA DE CONEJO AISLADA: lámina de tejido nervioso que reviste el interior de la parte posterior del ojo, vista en una fotografía tomada por el autor. La retina, cuyo espesor medio es tan sólo de alrededor de una décima de milímetro, es prácticamente transparente. La luz la atraviesa, alcanzando la capa de conos y bastones situada cerca de la superficie posterior. Esas células fotorreceptoras transforman la señal luminosa en señal nerviosa, que va transmitiéndose por las sucesivas capas de neuronas de la retina; en última instancia, la señal excita las células ganglionares, cuyos axones forman fibras (*filamentos blancos*) que se reúnen y constituyen el nervio óptico, que transmite la información al cerebro. Se distinguen dos pares de vasos sanguíneos, que cruzan la superficie anterior de la retina. Adelbert Ames III, del Hospital General de Massachusetts, desarrolló los métodos que han permitido aislar retina viva del ojo.

rían luego otras células dotadas de selectividad compleja ante los estímulos, pero aquélla es la más abundante y la mejor conocida, y puede, por tanto, servir de arquetipo.) Jerome Y. Lettvin, Humberto R. Maturana, Walter H. Pitts y Warren S. McCulloch, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, descubrieron las células selectivas direccionales en la retina de la rana. Unos años después se dilucidó con exactitud las propiedades de ese tipo celular, gracias a una serie de experimentos, hoy clásicos, con conejos rea lizados por Horace B. Barlow y William R. Levick, de la Universidad de Cambridge.

El comportamiento de una célula selectiva direccional varía según el estímulo luminoso esté en movimiento o quieto. Si se estimula el campo receptor de la célula con una luz fija, la respuesta es uniforme en toda la extensión de dicho campo receptor. Pero, si el punto luminoso se mueve lentamente a lo largo del campo, el comportamiento de la célula cambia radicalmente: transmite una serie ininterrumpida de potenciales de acción cuando el punto luminoso se mueve en un sentido, y transmite muy pocos, o ninguno, si lo hace en sentido contrario. Estos primeros resultados permitieron acotar las cuestiones básicas acerca del funcionamiento de los circuitos retinianos: ¿cuál es el cometido de los campos receptores de las células ganglionares? ¿Cómo consigue la maquinaria neuronal transformar tan selectivamente la información óptica? Para hallar las respuestas deberán estudiarse los elementos constituyentes de la retina con mayor detenimiento.

Como se ha mencionado, la retina posee dos conjuntos de neuronas diferentes: las que establecen una vía directa desde la fuente de luz hasta el nervio óptico y las que realizan conexiones laterales. Pronto se advirtió que la periferia antagonista que se había observado en algunas células ganglionares podía relacionarse con las neuronas de la vía lateral de la retina, suponiendo que éstas funcionasen de modo opuesto a las neuronas de la vía directa. En otras palabras, cuando el centro de una célula ganglionar respondía al estímulo de la luz (por medio de la vía directa), su periferia, que actuaba en sentido contrario, podría recibir estímulos liberados por las células horizontales o amacrinas. El descubrimiento de que las células bipolares poseían una periferia antagonista proporcionó la base para sacar a luz una función de las células horizontales. Dado que la célula bipolar era la única que se dirigía desde la zona externa (donde residían las células horizontales) hasta la zona interna de la retina, no había necesidad de postular ninguna otra estructura para explicar la existencia de la periferia antagonista.

Otras neuronas laterales, las células amacrinas, regulan el comportamiento de ciertas células ganglionares (incluidas las selectivas direccionales) que presentan una respuesta transitoria al estímulo luminoso. Cuando la luz alcanza la retina, estas células descargan inmediatamente una ráfaga de potenciales de acción, pero la interrumpen en presencia de un estímulo luminoso



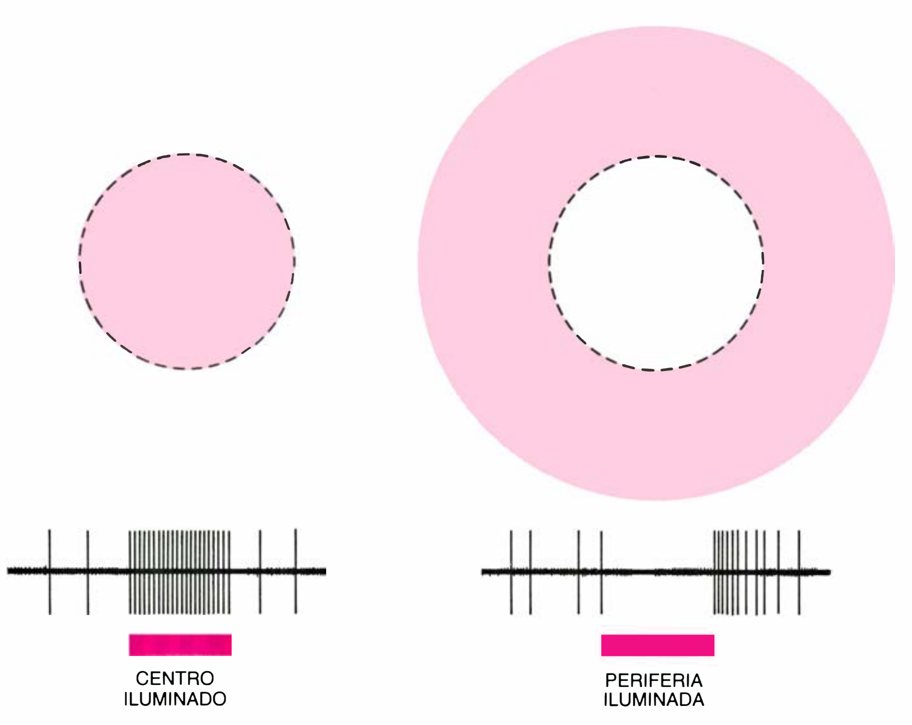
2. NEURONA RETINIANA, una célula horizontal, a la que se le ha inyectado el colorante fluorescente amarillo Lucifer, que tiñe todas las prolongaciones de la célula. En esta microfotografía, tomada por Julie H. Sandell, se observa una ramificación terminal de la célula. La información transcurre en sentido lateral a lo largo de las prolongaciones celulares y de las pequeñas ramitas hasta los botones terminales, que establecen sinapsis con otras células de la retina.

continuo. Las células fotorreceptoras, las bipolares y las horizontales no presentan ese comportamiento transitorio que, por el contrario, es característico de muchas células amacrinas. Así, una posible función de esas células es la de agudizar las respuestas transitorias de determinadas células ganglionares, incluidas las selectivas direccionales.

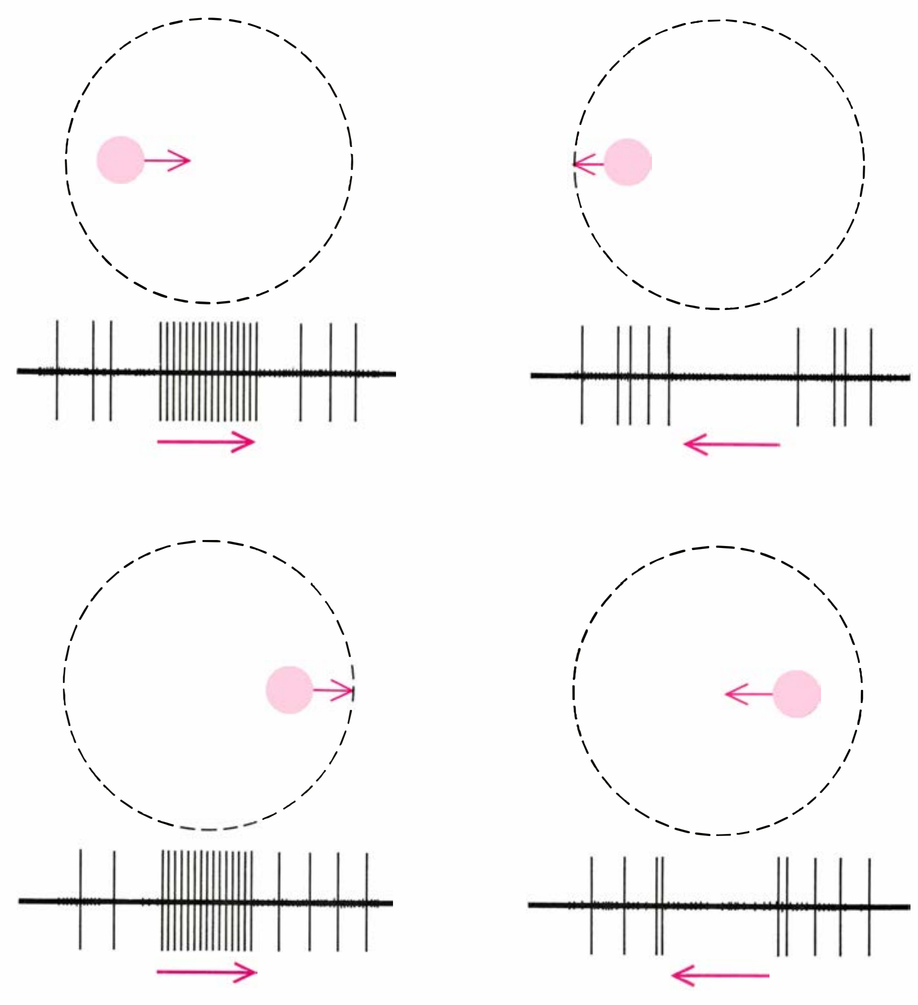
Empero, las células amacrinas deben poseer más funciones. Su variedad es desconcertante; en la retina puede haber hasta treinta tipos morfológicos distintos. Si las células amacrinas no tuvieran otra función que la de convertir en transitoria la respuesta de algunas células ganglionares, lo razonable sería que existiera un único tipo o, a lo sumo, unos cuantos.

El gran neuroanatomista español Santiago Ramón y Cajal describió, ya en 1892, la diversidad de células amacrinas existente. Durante mucho tiempo sus descubrimientos no se tuvieron en cuenta. Entre otras posibilidades, siempre cabía argüir que los tipos celulares descubiertos por Ramón y Cajal eran meras variantes, es decir, células que diferían en su aspecto si bien poseían la misma función. Hasta finales de la década de 1960, cuando Berndt Ehinger, de la Universidad sueca de Lund, empezó a estudiar la bioquímica de las células amacrinas, no se reconoció su diversidad. Ehinger aplicó al estudio de la retina nuevas técnicas de identificación de los neurotransmisores existentes en las secciones finas de tejido nervioso. Descubrió que muchos de los neurotransmisores cerebrales se encontraban también en las neuronas de la retina. Lo sorprendente fue que esos neurotransmisores se localizaban en el interior de las células amacrinas, y cada uno de ellos en un tipo celular diferente. El hallazgo confirmó la diversidad de tipos de células amacrinas.

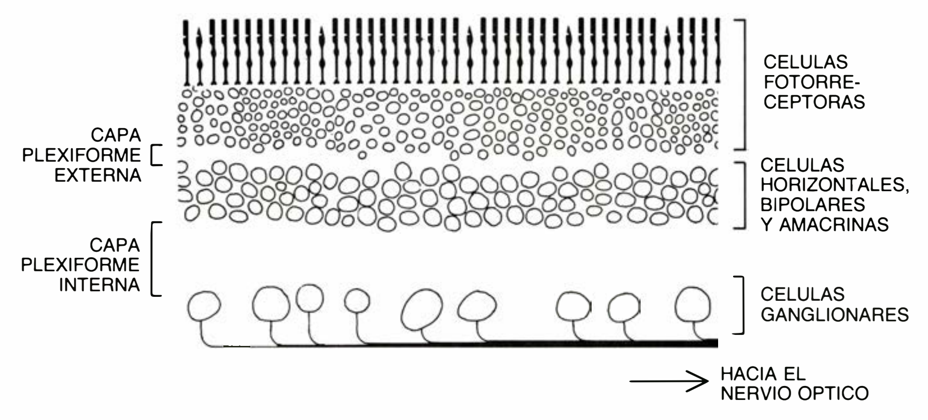
Los resultados obtenidos por Ehinger se recibieron con cierto escepticismo. Las técnicas empleadas eran nuevas y se podía aducir que las poblaciones de células amacrinas se habían sobreestimado o, por el contrario, infravalorado. Sin embargo, en trabajos posteriores, realizados por otros investigadores, se llegó a conclusiones comparables. Entre esos trabajos se contaba un estudio, de John W. Mills y el autor, sobre las células amacrinas que sintetizan el neurotransmisor denominado acetilcolina. Se incubaron retinas de conejo aisladas en presencia de colina marcada radiactivamente. La colina es el precursor a partir del cual la



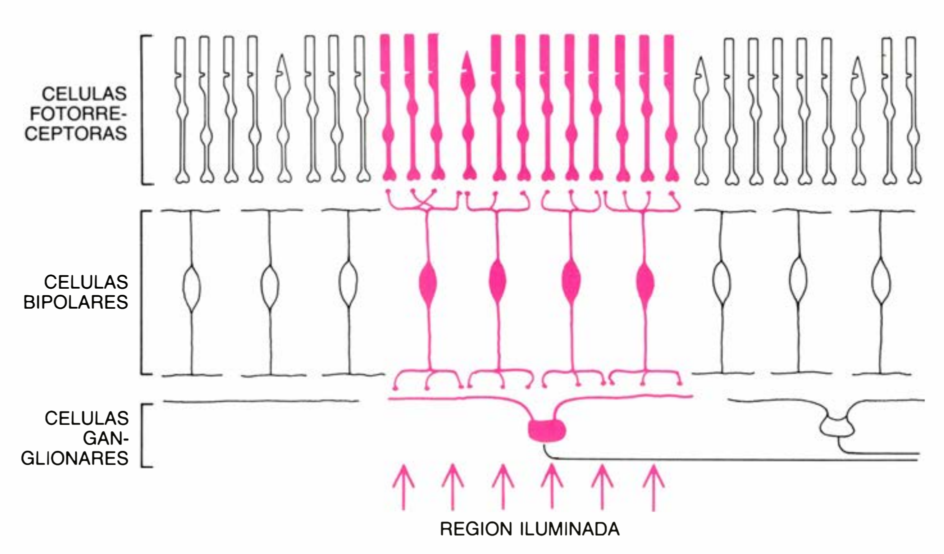
3. CAMPO RECEPTOR CONCENTRICO, que presenta una región central donde la proyección de un pequeño punto luminoso afecta de un modo a la célula ganglionar (registrada por un microelectrodo que mide la actividad de un axón del nervio óptico) y una región periférica en la que el efecto es opuesto (*arriba*). En el caso de una célula central, el estímulo del centro determina un aumento de la actividad (*abajo, a la izquierda*), mientras que el estímulo de la periferia provoca una disminución (*abajo, a la derecha*).



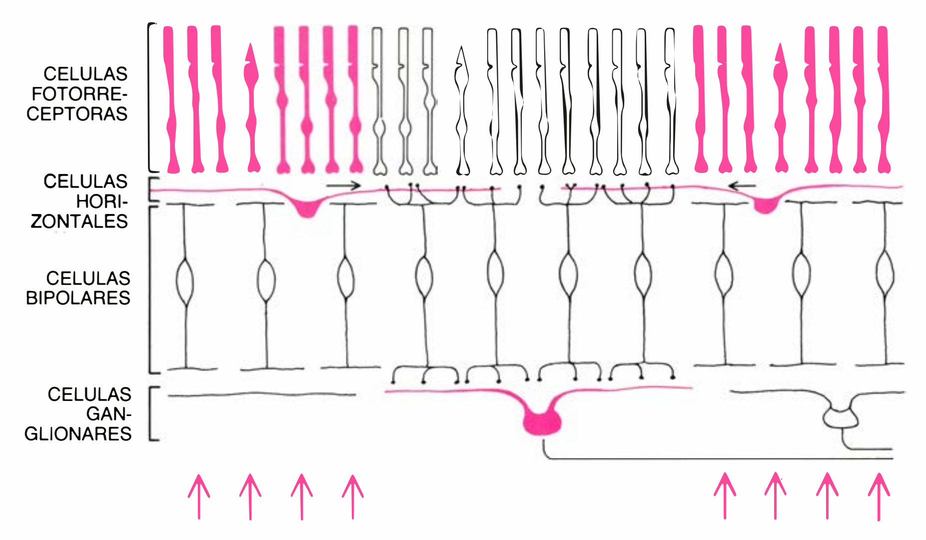
4. CELULA SELECTIVA DIRECCIONAL, que responde cuando un punto se mueve en un sentido (hacia la derecha en este diagrama) y se inhibe si el punto se mueve en sentido contrario. El sentido del movimiento se detecta en cualquier lugar del campo receptor donde incida el punto luminoso de estímulo.



5. CUERPOS DE LAS NEURONAS DE LA RETINA, que se disponen en tres capas superpuestas. Además, existen otras dos capas de sinapsis, en las cuales las prolongaciones celulares (axones y dendritas), que no se han representado en este diagrama esquemático, se entrelazan y establecen contactos sinápticos mutuos.



6. VIA DIRECTA PRINCIPAL DE LA RETINA, constituida por tres tipos diferentes de neuronas: las células fotorreceptoras, las bipolares y las ganglionares, todas ellas recogidas en esta imagen aumentada. Una retina compuesta exclusivamente por estas células informaría de la incidencia de luz, pero sus células ganglionares no presentarían características selectivas: tan sólo manifestarían la respuesta "central".



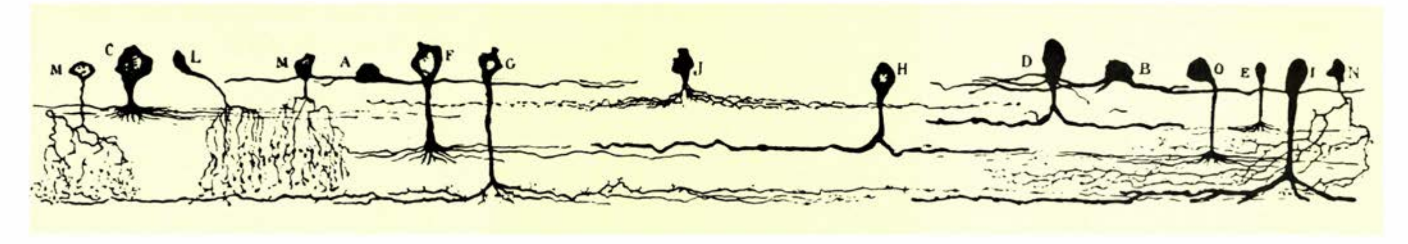
7. INTERACCIONES LATERALES, que dan cuenta de la existencia de características selectivas del tipo del antagonismo de la periferia de los campos receptores. Supóngase que las células horizontales ejercen (*flechas negras*) sobre las células bipolares un efecto opuesto al directo debido a las células fotorreceptoras; las señales transmitidas en última instancia a la célula ganglionar tendrán entonces un centro y una periferia antagonista. Se conocen mal las auténticas conexiones de las células horizontales implicadas en ese efecto.

célula sintetiza acetilcolina. El siguiente objetivo consistió en inmovilizar la acetilcolina para obtener autoradiografías (método con el que se detecta la radiactividad de las secciones hísticas) de suertet que pudiera determinarse qué células habían sintetizado acetilcolina. Para ello se utilizó una técnica de congelado rápido. Se sumergieron las muestras de retina viva en propano a −180 grados Celsius, que congelaba y secaba el tejido; seguidamente, mediante ciertos métodos que evitan que las muestras entren en contacto con la humedad, se preparaban para efectuar la autorradiografía.

Se trata de un proceso tedioso, que queda compensado por una virtud fundamental: la congelación inmoviliza la acetilcolina del tejido en pocos milisegundos; posteriormente, cuando se localiza por medio de la autorradiografía, debe encontrarse todavía en el interior de la célula a la que pertenecía. Por tanto, esa metodología descartaba algunas de las dudas que ofrecían los anteriores métodos de identificación de neurotransmisores en el interior celular. El marcaje era característico y bien definido: las células se marcaban densamente o bien no se marcaban nada. La acetilcolina sólo se encontraba en el interior de unos pocos tipos de células amacrinas. Posteriormente, otros laboratorios confirmaron también los hallazgos fundamentales de Ehinger. Tal y como sugería este autor, cada neurotransmisor se localizaba en un pequeño subgrupo de células amacrinas.

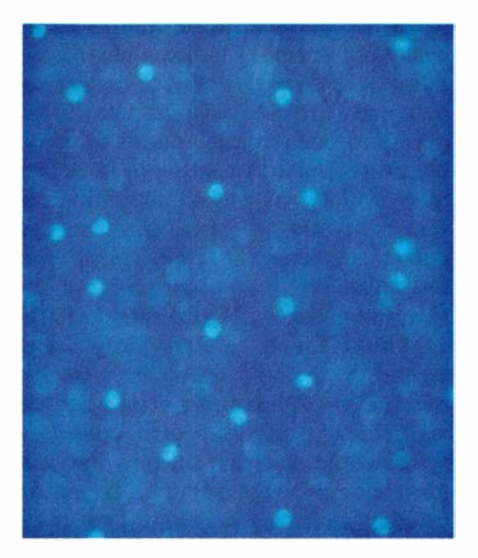
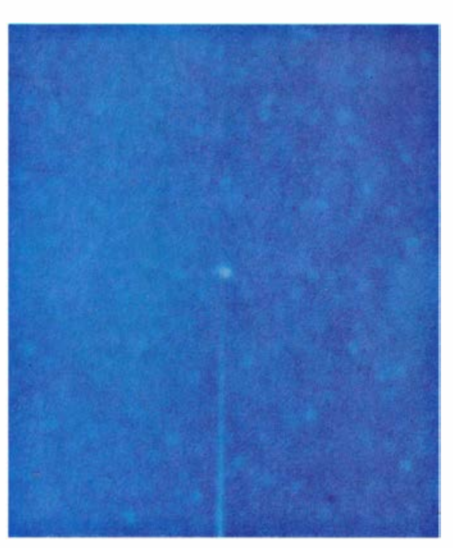
Gracias a esa información, podía pensarse ya en el establecimiento de una relación entre cada neurotransmisor y los tipos morfológicos de células amacrinas, como los que describiera Ramón y Cajal. Pronto se comprobó que las células amacrinas que presentaban árboles dendríticos distintos correspondían a un neurotransmisor particular. Más aún, entre otras pruebas, el trabajo de Nicholas C. Brecha y Harvey J. Karten, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, demostraba que las diversas células amacrinas no sólo contenían los neurotransmisores tradicionales, sino también muchos de los neuropéptidos del organismo (una amplia familia de péptidos descubiertos recientemente que actúan como neurotransmisores). Este hallazgo extendió la diversidad de células amacrinas más allá de cuanto se había sospechado.

El descubrimiento de la estrecha correlación que guardan la morfología y la química de las sinapsis en las células

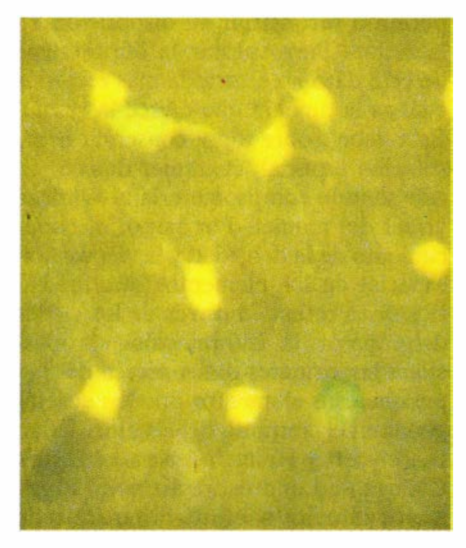
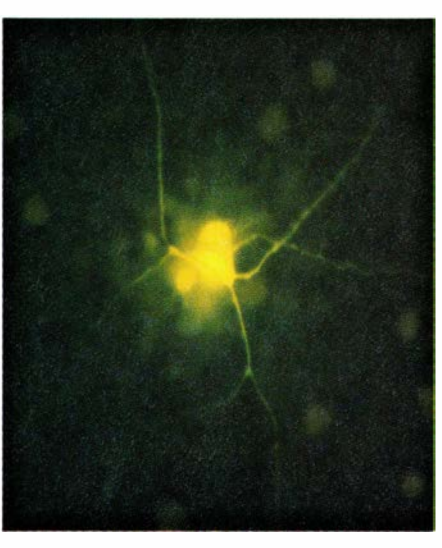
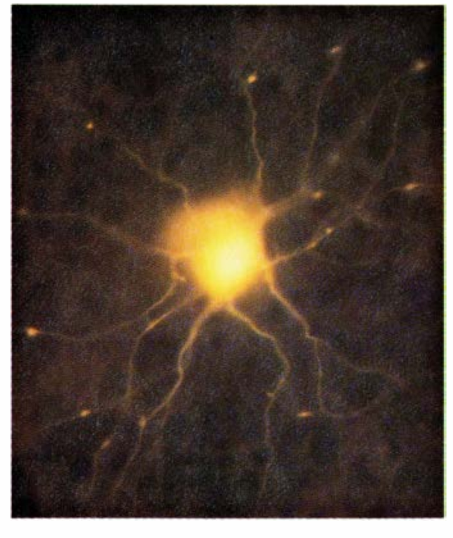


8. AMPLIA VARIEDAD de células, recogida en este dibujo de las células amacrinas de la retina de la carpa, publicado en 1892 por el eminente neuroanatomista español Santiago Ramón y Cajal. Fue capaz de distinguir hasta catorce tipos celulares distintos basándose exclusivamente en su morfología respectiva.

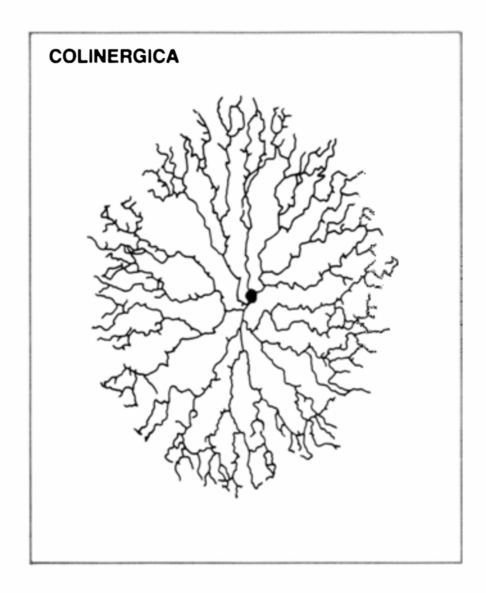
amacrinas llevó a una segunda consecuencia, de importancia decisiva. Confirmó, por encima de toda duda, que las células amacrinas de morfología diferente poseían funciones biológicas distintas. Cuando un neurotransmisor se une al receptor de la célula postsináptica, en ésta se registran cambios bioquímicos y fisiológicos específicos. Si las células amacrinas difieren en su morfología (señal de que también lo son las conexiones que establecen en la retina) y a la vez contienen distintos neurotransmisores, sus funciones biológicas no pueden ser las mismas. ¿Y qué funciones podrían desempeñar 30 tipos diferentes de células amacrinas? Obviamente, cada tipo celular posee una función específica, pero da la impresión de que existen más clases de células que tareas a desempeñar. En mi laboratorio, y en otros, se están empezando a desentrañar algunas de esas funciones. Describiré el trabajo reali-

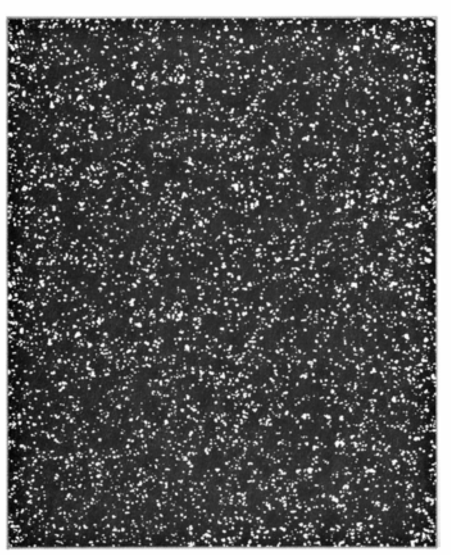



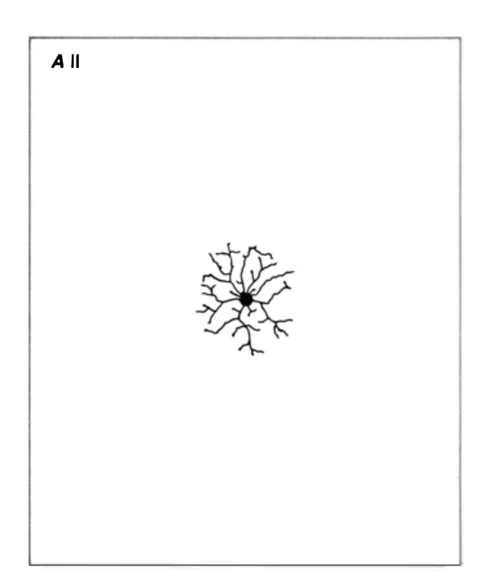

9. CELULAS AMACRINAS COLINERGICAS (que contienen el neurotransmisor acetilcolina), teñidas mediante una técnica desarrollada por Masaki Tauchi y el autor. La retina se aplana y se obtiene una sola capa íntegra. Los cuerpos de las células amacrinas colinérgicas acumulan selectivamente DAPI, un colorante azul fluorescente (*izquierda*). Ello permite dirigir una micropipeta, que contiene el colorante amarillo Lucifer, hacia el interior de células amacrinas individuales en condiciones de iluminación que consiguen que ambos colorantes presenten fluorescencia (*centro*). En condiciones de iluminación distintas (*derecha*), sólo presenta fluorescencia el amarillo Lucifer, revelándose de ese modo el patrón de ramificación propio de las dendritas de las células colinérgicas.

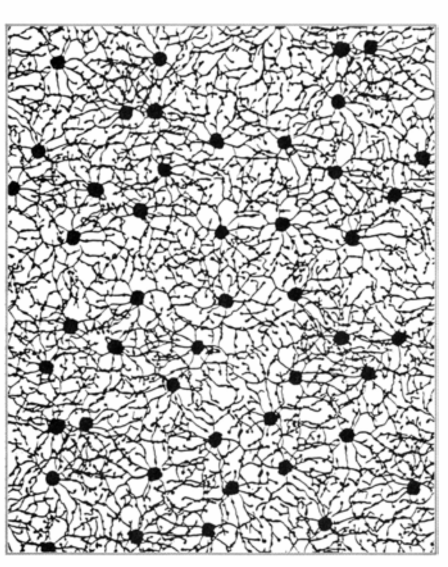




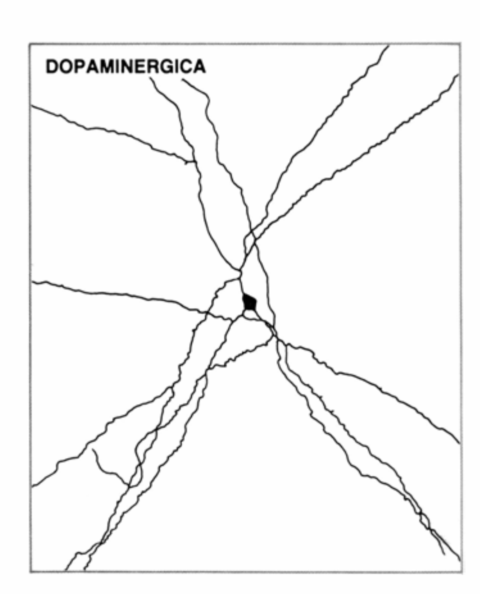
10. OTROS DOS TIPOS DE CELULAS AMACRINAS, teñidos con el mismo método. Se trató una retina para que los cuerpos de las células amacrinas dopaminérgicas presentaran fluorescencia verde y los de las células amacrinas acumuladoras de indolaminas amarilla (*izquierda*). Mediante la técnica de inyección en células aisladas se muestra la disposición de las dendritas de las células dopaminérgicas (*centro*) y de las células acumuladoras de indolaminas (*derecha*).

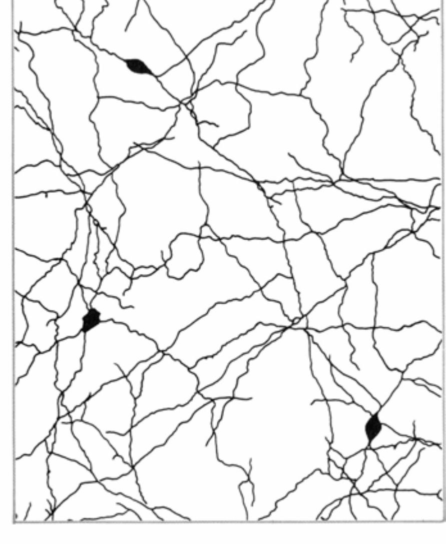












11. MOSAICOS de las distintas células amacrinas, que recubren la retina de modo diferente. Se muestran tres tipos celulares, en una imagen aplanada. A la izquierda se representan las células aisladas; los dibujos de la derecha muestran una aproximación del mosaico que resultaría en el caso de que todas las células de una misma clase se tiñeran simultáneamente. Las células colinérgicas son muy numerosas, y sus dendritas ramificadas forman una malla casi ininterrumpida (*arriba*). El mosaico de las células amacrinas AII es poco denso (*centro*): deja más espacio entre sus dendritas. Las células dopaminérgicas están aún más dispersas (*abajo*). Los dibujos, del autor, se confeccionaron basándose en la forma y la densidad media de las células.

zado sobre cuatro tipos muy distintos de células amacrinas.

Hemos mencionado ya el primero. Se trata de la célula amacrina colinérgica; identificada por técnicas de autorradiografía, contiene acetilcolina. Un inconveniente de ese método analítico es que revela el cuerpo celular de la neurona, pero no sus prolongaciones: los axones y las dendritas, que son las partes que transmiten y reciben mensajes. En realidad, la principal técnica morfológica para visualizar los procesos neuronales era la técnica de Golgi (la misma que utilizó Ramón y Cajal en el siglo XIX). Sin embargo, ese procedimiento no está sujeto a control: aunque tiñe la célula entera, no puede seleccionarse previamente cuál se desea marcar.

Mi descubrimiento de que la molécula fluorescente 4,6-diamidino-2-fenilindol (DAPI) se acumulaba selectivamente en los cuerpos celulares de las neuronas colinérgicas apuntó un posible procedimiento sustitutivo de la técnica de Golgi. Si se trata una retina entera con DAPI y posteriormente se aplana, las neuronas colinérgicas emiten, sobre un fondo oscuro, una sugestiva fluorescencia. Hecho que permitió a Masaki Tauchi, alumno de posdoctorado, y al autor introducir una minúscula micropipeta en el interior de las células e inyectar otro colorante fluorescente, amarillo Lucifer. Este colorante se propaga por toda la red de prolongaciones de la célula. Los resultados obtenidos fueron perfectamente coherentes: todas las células fluorescentes poseían la misma morfología y el mismo patrón de prolongaciones.

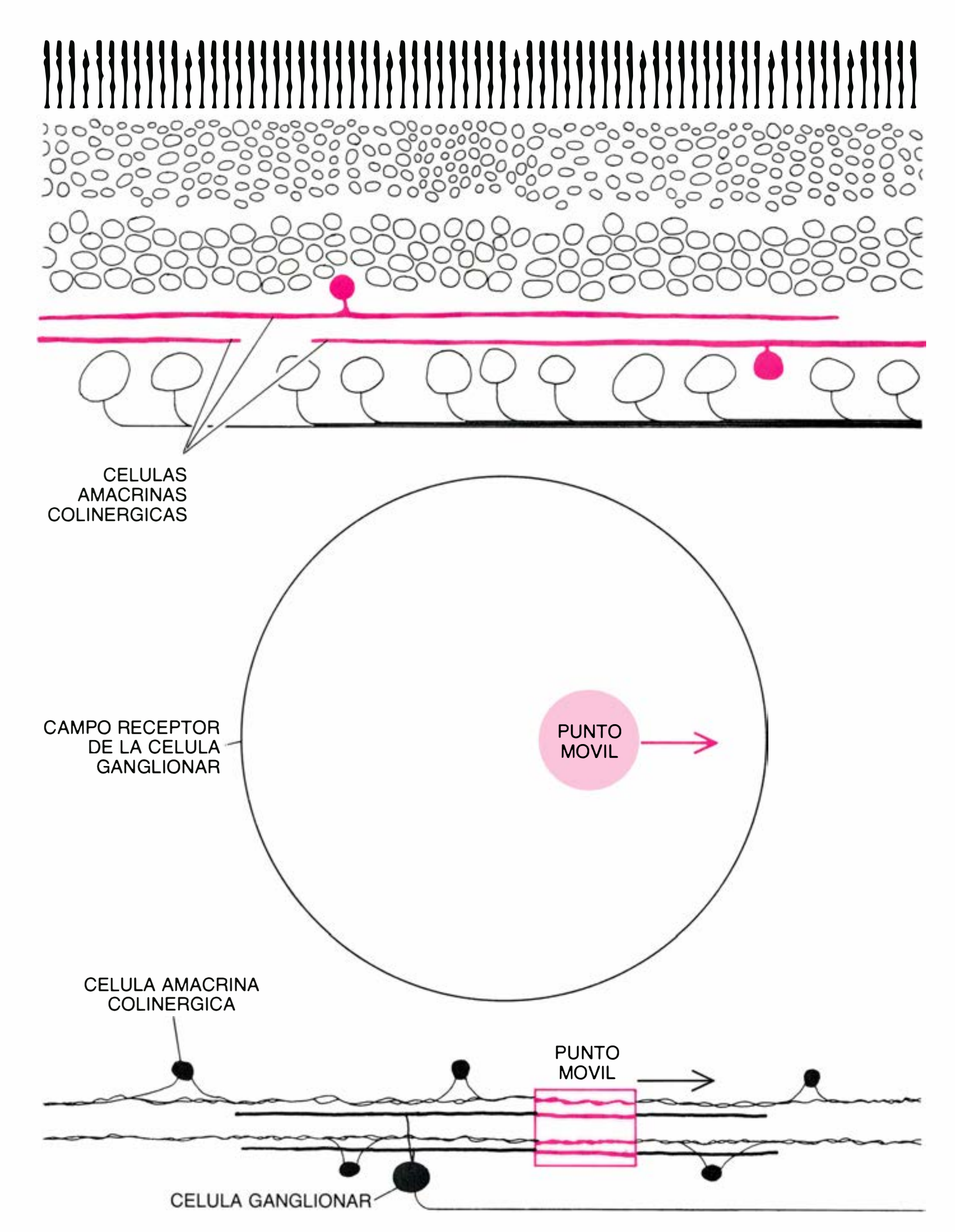
El método, además de mostrar la forma real de las células colinérgicas, permitió reconstruir su disposición en la retina. Para valorar la importancia de este dato no estará de más recordar cuál es la función que ejerce la retina. Esta debe, sobre todo, conservar la resolución espacial; cualquier defecto en este sentido comprometería la agudeza visual del animal. Por tanto, el conocimiento de la densidad y la disposición espacial de los elementos intermediarios de la retina –a través de los cuales debe pasar la información– proporciona importantes datos acerca del papel que esos elementos pueden desempeñar en el conjunto del sistema. Brian B. Boycott y Heinz Wässle, del King's College de Londres, realizaron los primeros estudios sobre la disposición de las células en la retina. Trabajaron con dos tipos celulares, cuyas poblaciones se adecuaban a la tinción por métodos

clásicos. Nuestra técnica de fluorescencia facilitaba el estudio de otras muchas células.

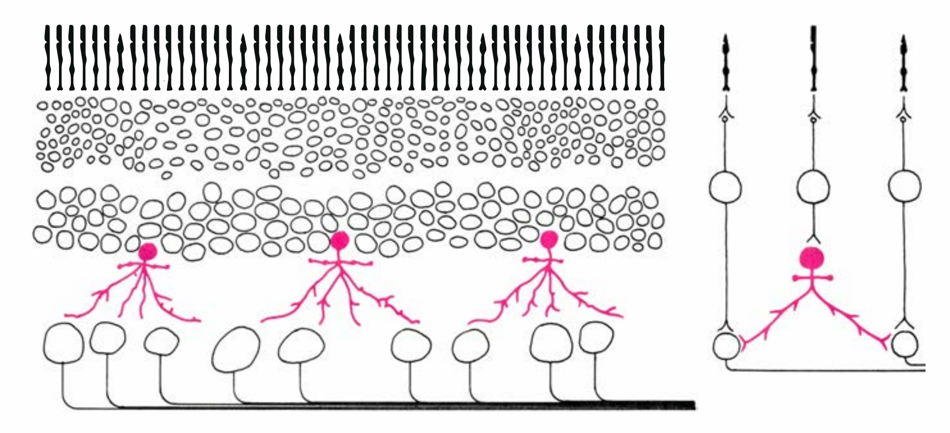
Cuando Tauchi y el autor midieron el tamaño y la densidad de las células colinérgicas, obtuvieron un resultado sorprendente: evidenciaban una fuerte inclinación a superponerse unas sobre otras. En la retina periférica, donde el solapamiento era mayor, llegaban a coincidir, en un mismo punto de la superficie, las prolongaciones de unas 140 células amacrinas colinérgicas. El trabajo de Boycott y Wassle apuntaba un escaso solapamiento. No se esperaba una superposición de tal magnitud.

El tipo de estímulos que resolvían las células amacrinas sugirió una posible explicación de aquel exceso. Se sabía, por anteriores trabajos de electrofisiología, que las amacrinas colinérgicas excitaban ciertas células ganglionares, entre las que se contaban las selectivas direccionales; eran éstas capaces de detectar el movimiento de puntos de luz muy pequeños –menores que su propio campo dendrítico, y también mucho menores que el campo dendrítico de las células amacrinas colinérgicas. Dado que la mayoría de las neuronas transmiten simultáneamente el mismo mensaje a través de todas sus sinapsis, resultaba lógico esperar que la célula amacrina liberase acetilcolina desde todos los puntos de su árbol dendrítico, cualquiera que fuera el punto excitado. ¿Cómo podía una célula de tamaña extensión transmitir información precisa acerca de un estímulo menor que ella misma?

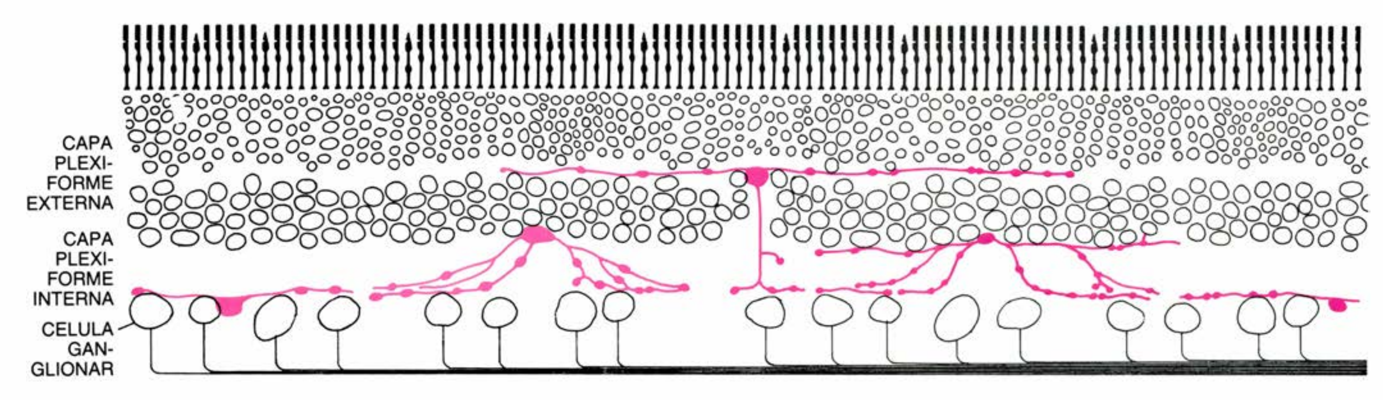
En nuestra opinión, las dendritas de la célula amacrina se encuentran eléctricamente aisladas, lo que permite que una región libere localmente acetilcolina hacia una célula ganglionar, sin que se produzca liberación del neurotransmisor en zonas más distantes. Ello concuerda con la estructura de las amacrinas, donde las transmisiones de entrada y de salida coexisten unas al lado de otras en la misma prolongación. La actividad eléctrica de las células amacrinas se limita a la emisión de potenciales eléctricos de diverso grado; la célula no genera impulsos nerviosos, que se propagarían por todo su árbol dendrítico. Por tanto, su actividad probablemente no trascienda mucho más allá del punto de entrada. La obtención de pruebas directas que confirmen el mecanismo se encuentra hoy fuera del alcance de nuestras posibilidades, pero no se adivina otro modo de explicar la resolución de la célula selectiva direccional. Por otra parte, tal mecanismo



12. RESOLUCION de las células amacrinas colinérgicas, que puede explicarse por el hecho de que sus dendritas son, a la vez, prolongaciones de entrada y de salida de las señales, y pueden actuar de forma aislada al resto de la célula. Las células amacrinas colinérgicas se muestran esquemáticamente (*color*) en una sección vertical de la retina completa (*arriba*). Los bordes de un punto que se mueve en el campo receptor de una célula ganglionar (*centro*) excitan sólo ciertas regiones del mosaico que forman las dendritas de las células amacrinas (*abajo*); así, las dendritas colinérgicas excitan la célula ganglionar sólo en la región iluminada.



13. CELULA AMACRINA AII (*color*), que se sitúa entre las células bipolares que conectan con los bastones y las células ganglionares (*izquierda*). Constituye un puente entre esos dos tipos celulares (*derecha*). Se muestran aquí esquemáticamente las conexiones celulares; en realidad, la célula amacrina AII se conecta a células ganglionares de diferentes tipos mediante distintas vías. Las AII son pequeñas y se apiñan densamente.



14. CELULAS ACUMULADORAS DE INDOLAMINAS (*color*), que presentan cinco variantes. Cuatro son como las demás células amacrinas; la quinta es inusual: tiende un puente entre las capas plexiforme externa y plexiforme interna. Todas envían prolongaciones hacia el nivel más profundo de la capa plexiforme interna, donde la mayoría establece sinapsis con las células bipolares. Parece que tienden cinco caminos diferentes hacia un punto final común.

explicaría la existencia de la densa malla de dendritas: se detectaría un estímulo pequeño, sin importar en qué zona del campo receptor de la célula ganglionar incidiese.

Vayamos con el segundo tipo de célula amacrina: la AII. Distínguese de la colinérgica por su extensión lateral, extremadamente breve. David Vaney, de la Universidad de Cambridge, logró describir el mosaico que forman esas células gracias a una adaptación de nuestra técnica de inyección fluorescente. Las AII abundan y cubren la superficie entera de la retina, pero son tan pequeñas que sus dendritas apenas se superponen unas a otras.

Varios investigadores más han estudiado las células AII. Citaré a Helga Kolb y Ralph F. Nelson, del Instituto Nacional estadounidense de la Salud, Barbara A. McGuire, Peter Sterling y John K. Stevens, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Pennsylvania, y Ramon F. Dacheux y Elio Raviola, de la Facultad de Medicina de Harvard. Gracias a cuyos trabajos puede hoy responderse a la pregunta que formularan hace algunos años Kolb y Edward V. Famiglietti: ¿por qué descargan las células ganglionares en respuesta a la luz débil, si no establecen una sinapsis directa con las células bipolares, que se activan por estímulo de las células fotorreceptoras denominadas bastones? Sólo los bastones responden al estímulo de la luz débil; los gatos, como la mayoría de los mamíferos, pueden ver en presencia de muy poca luz. Sin embargo, se ha demostrado anatómicamente que las células ganglionares de los gatos reciben muy pocas, si alguna, señales directas desde las células bipolares en conexión con los bastones.

La respuesta nos la ofrece, en buena parte, en la actividad de las células amacrinas AII. Según parece, desempeñan dos funciones: al igual que muchas otras amacrinas, transmiten, en respuesta al estímulo luminoso, una señal transitoria hacia las células ganglionares, aumentando con ello la intensidad de la respuesta de éstas al comienzo de dicho estímulo. Pero también conectan las células bipolares activadas por los bastones con las células ganglionares. Hecho que permite a la célula ganglionar actuar en condiciones de luz intensa y de luz débil. En realidad, la amacrina AII, en virtud de estas conexiones, forma parte de la vía directa de la retina. El flujo de información va del bastón a la célula bipolar, a la amacrina AII y a la célula ganglionar. Es lógico que las amacrinas AII sean pequeñas y se apiñen densamente: así mantienen elevada la intensidad de la señal a lo largo de esa vía fundamental.

La tercera célula, al igual que la primera, se identifica por su neurotransmisor, en este caso la dopamina. Tauchi y el autor descubrieron que resultaba aplicable en esas células la misma técnica de inyección con fluorescencia que se había utilizado en el estudio de las células colinérgicas. Llamó nuestra atención la escasez de células dopaminérgicas de la retina. Por ejemplo, la retina del conejo contiene (en números redondos) 350.000 células ganglionares y 300.000 células amacrinas colinérgicas, pero sólo unas 8500 células amacrinas dopaminérgicas. Por otra parte, las dopaminérgicas poseen pocas dendritas, y éstas, además, se ramifican en segmentos muy finos, configurando un mosaico repleto de espacios huecos, que contrasta con el denso apelotonamiento de las células amacrinas que ya hemos descrito.

Se ignora la función exacta de las células dopaminérgicas. Ahora bien, su disposición holgada sugiere claramente que no se relacionan con actividades que requieren un elevado nivel de resolución espacial. Mientras que el mosaico que forman las células amacrinas colinérgicas, de extraordinaria densidad, permite la resolución exacta de un pequeño punto luminoso que estimule la retina, en el caso de las células dopaminérgicas un estímulo de tamaño reducido incidiría, frecuentemente, en los espacios huecos que deja su red. En otras palabras, es improbable que la célula dopaminérgica controle alguna de las características evidentes de los campos receptores de las células ganglionares. John E. Dowling y Ehinger descubrieron en Harvard, sirviéndose de técnicas de microscopía electrónica, que las dopaminérgicas establecían sinapsis sólo con otros tipos de amacrinas. No presentaban relación directa con la vía directa principal de la retina. Por otro lado, ciertos experimentos electrofisiológicos indicaban que las células dopaminérgicas influían sobre la actividad de las células ganglionares de modo impreciso, difícil de definir. Cabía la posibilidad de que su función fuera difusa, por ejemplo, que actuaran de intermediarios en la excitabilidad global de las neuronas de la parte interna de la retina.

La última célula amacrina que abordaremos se distingue por su capacidad de acumular sustancias químicamente análogas al neurotransmisor serotonina. Por ser indolaminas, la serotonina y sus análogos se denominan células "acumuladoras de indolaminas". Julie H. Sandell (alumna de posdoctorado) y el autor examinaron ese tipo celular y estudiaron su morfología marcando la retina con un análogo fluorescente de la serotonina, la 5,7-dihidroxitriptamina.

Descubrieron que esa clase de amacrinas se subdividía en cinco tipos mor-

fológicos distintos, si bien presentaban tantas características comunes que resultaba preferible considerarlas una familia de células, y no tipos celulares funcionalmente independientes. Muchas razones lo aconsejaban así. En primer lugar, el tamaño, forma y patrón de ramificación de sus dendritas compartían rasgos que las diferenciaban de las dendritas de las restantes amacrinas. En segundo lugar, transportaban y acumulaban el mismo análogo de la serotonina. Finalmente, y lo que era más importante, el conjunto de sus dendritas configuraba un denso plexo, o red, que se disponía en el margen más profundo de la capa plexiforme e interna de la retina (o capa de sinapsis interna). En esa zona, tales células establecían un tipo de sinapsis característico, denominado sinapsis recíproca, con las prolongaciones terminales de las células bipolares que conectaban con los bastones.

Las diferencias existentes entre esas células, en particular lo referente a sus conexiones sinápticas y su morfología global, se manifestaban fuera del plexo. Dado que las células acumuladoras de indolaminas se ramificaban extensamente y establecían contacto con muchas de las células bipolares conectadas a los bastones, si no todas, se pensó que afectaban de forma importante a la vía que seguía la luz débil a través de la retina. La conclusión lógica era que las cinco células acumuladoras de indolaminas representaban cinco vías distintas, merced a las cuales otras neuronas de la retina podían interactuar con las células bipolares de los bastones.

Como prueba esta breve muestra de células amacrinas, la retina contiene gran cantidad de circuitos, extremadamente complejos. De hecho, la complejidad de la retina desconcierta a los propios neurobiólogos. "Se supone que la retina es un sistema sencillo", suelen lamentarse los científicos, "¿cómo puede resultar más complicada



15. CAPA PLEXIFORME INTERNA, aumentada unos 50.000 diámetros, en una microfotografía electrónica (*arriba*) realizada por Ramon F. Dacheux y Elio Raviola, de la Facultad de Medicina de Harvard. Se distinguen dendritas neuronales; en el dibujo (*abajo*) se esquematizan algunas de ellas. El material oscuro del interior de algunas de las dendritas indica que se trata de células acumuladoras de indolaminas. La tinción fluorescente habitual se convertía en material electrodenso mediante una técnica desarrollada por Sandell y el autor. En las sinapsis (*flechas*) se pueden ver las vesículas (*círculos pequeños*) que contienen los neurotransmisores.

que otras estructuras del cerebro?" Por bromear, cabe objetarles que la retina parece complicada porque se conoce mejor. (Por supuesto, el deseo subyacente es que la retina no sea especialmente complicada; si una estructura que se supone prototipo de la simplicidad resulta tan compleja, ¿cuánto no será la corteza cerebral?) Pero hay respuestas más serias.

La primera de ellas es que la tarea principal de la retina, convertir las señales luminosas en una serie de impulsos nerviosos con significado, requiere una maquinaria compleja. En este artículo se ha abordado un solo aspecto del proceso de codificación del estímulo visual que ejerce la retina: la organización de dos clases distintas de campos receptores de las células ganglionares. Se ha omitido, por ejemplo, toda referencia a la extraordinaria capacidad de la retina para alterar sus propios niveles de sensibilidad. En cada escalón de la jerarquía retiniana se realizan ajustes internos de la sensibilidad. Tales ajustes permiten a la mayoría de los mamíferos ver bien tanto a la luz del sol como a la de las estrellas, lo cual supone una diferencia de intensidad lumínica del orden de 10.000 millones. La retina es capaz también de transmitir al cerebro información acerca de la longitud de onda de la señal luminosa que recibe, posibilitando que el ser humano y otros vertebrados distingan los colores. Dada la complejidad de los cometidos que lleva a cabo la retina, es lógico que su estructura también lo sea.

Una segunda respuesta sería la siguiente: quizá lo que en apariencia son funciones sencillas exigen circuitos complejos. ¿Quién habría predicho, por ejemplo, que las células bipolares de los bastones no establecían sinapsis directas con las células ganglionares? Parece ilógico que la conexión discurra por vía de las células amacrinas AII. No sólo constituye un modo indirecto de comunicación, sino que incorpora, a su vez, un componente de propagación lateral, por pequeño que sea, a la vía de la visión y supone, por tanto, una amenaza para la agudeza visual. Si las células bipolares de los conos se conectan directamente a las células ganglionares, ¿por qué razón no habrían de hacerlo las células bipolares de los bastones? La única conclusión posible es que las células amacrinas AII resuelven un problema que ni siquiera conocemos todavía.

La tercera respuesta, y probablemente la mejor, afirma que la retina aloja mucha complejidad en un región muy pequeña. Todas las porciones del sistema nervioso central operan en espacios reducidos, pero hallar uno tan limitado como lo está en la retina resulta algo excepcional. Y por dos razones; primera: las células retinianas deben amontonarse muy densamente con el fin de maximizar la agudeza visual; segunda: la retina debe ser muy fina (en el conejo, aproximadamente de una décima de milímetro) para que la luz penetre hasta la capa de conos y bastones. En un milímetro cuadrado de la retina central del conejo se apiñan 9,4 metros lineales de dendritas de las células colinérgicas. Añádanse las dendritas de las restantes neuronas retinianas, y la densidad de prolongaciones celulares resultará abrumadora. No es extraño, pues, que las neuronas de la retina sean menores que la mayoría de las demás neuronas del sistema nervioso. Si sus cuerpos celulares fueran de la talla de los del cerebro humano, el ojo del hombre alcanzaría el volumen de una naranja. En resumen, la retina es una maravilla de la miniaturización.

La investigación de la estructura retiniana está a punto de entrar en una fase nueva y prometedora: la reconstrucción en tres dimensiones de los grupos de neuronas que guardan relación funcional. Las técnicas que se han desarrollado para revelar la forma de las neuronas de la retina pueden fácilmente combinarse con la microscopía electrónica. Tales técnicas proporcionan una guía para reseguir las dendritas a todo lo ancho de cada capa sináptica y, por tanto, simplifican el trabajo a realizar con el microscopio electrónico. Por otra parte, la propia miniaturización, que suele suponer un obstáculo para el estudio de las células retinianas, se toma como aliada cuando se trata de la reconstrucción tridimensional. El apilamiento de las células de la retina facilita el examen de circuitos retinianos completos por medio de microfotografías electrónicas de secciones hísticas seriadas y posterior reconstrucción del circuito.

Aunque el método se encuentra en sus primeros pasos, el valor de los modelos espaciales resulta evidente. Tales reconstrucciones proporcionan una descripción fundamental de la disposición e interconexiones de las células de la retina. Precisaremos nuevas técnicas de estudio para determinar el funcionamiento eléctrico y químico de esas estructuras. Cuando se conozcan, culminará el trabajo iniciado por Ramón y Cajal hace ahora casi un siglo.

Respuesta de las raíces a la gravedad

Los botánicos descubrieron hace un siglo que las raíces que habían perdido su verticalidad se curvaban hacia abajo en respuesta a la gravedad. Se empieza ya a poder interpretar el mecanismo fisiológico que subyace a esa pauta

Michael L. Evans, Randy Moore y Karl-Heinz Hasenstein

En el espacio exterior, libre de la fuerza de la gravedad, no existe arriba ni abajo. Cuando una planta situada en posición arbitrariamente designada como vertical la ponemos en horizontal, el tallo y la raíz siguen creciendo en línea recta; no recuperan la posición inicial. En tierra, por el contrario, los vegetales se comportan de un modo muy distinto. Presentan "gravitropismo" (el geotropismo de antaño); sus partes modifican la posición en respuesta a estímulos gravitatorios, es decir, adoptan nuevas posiciones en relación a la gravedad. Si se cambia la orientación de una planta que crece en vertical, el brote se curva hacia arriba, avanzando en sentido contrario al de la fuerza de gravedad. La raíz, que constituye el objeto de nuestras investigaciones, se curva hacia abajo, en el sentido de la gravedad. A menudo, las raíces empiezan a reorientar su posición ya a los 10 o 30 minutos después de que actúe sobre ellas el estímulo gravitatorio.

A un observador ocasional podría parecerle que esa curvatura hacia abajo responde lisa y llanamente a la búsqueda de agua, o constituye una respuesta pasiva a la gravedad. No hay tal. Ciertamente, las raíces de algunas plantas buscan agua, pero la gravedad ejerce un efecto independiente sobre el sentido del crecimiento de la raíz. Más aún, las raíces en desarrollo, dotadas de fuerza suficiente para penetrar en suelos compactos, poseen también el vigor necesario para resistir la atracción directa de la gravedad. El gravitropismo de las raíces obedece a un mecanismo distinto.

Los botánicos vienen intentado descubrir ese mecanismo desde antes de Charles Darwin, cuyo libro *The Power of Movement in Plants*, publicado en 1881, ofrece descripciones minuciosas de gravitropismos. Empero, ha habido que aguardar al advenimiento de los programas espaciales, y al subsiguiente aumento de los fondos destinados a la investigación sobre los efectos de la gravedad y sobre la gravedad nula, para que se registraran avances significativos en la descripción de los procesos responsables del gravitropismo de las raíces.

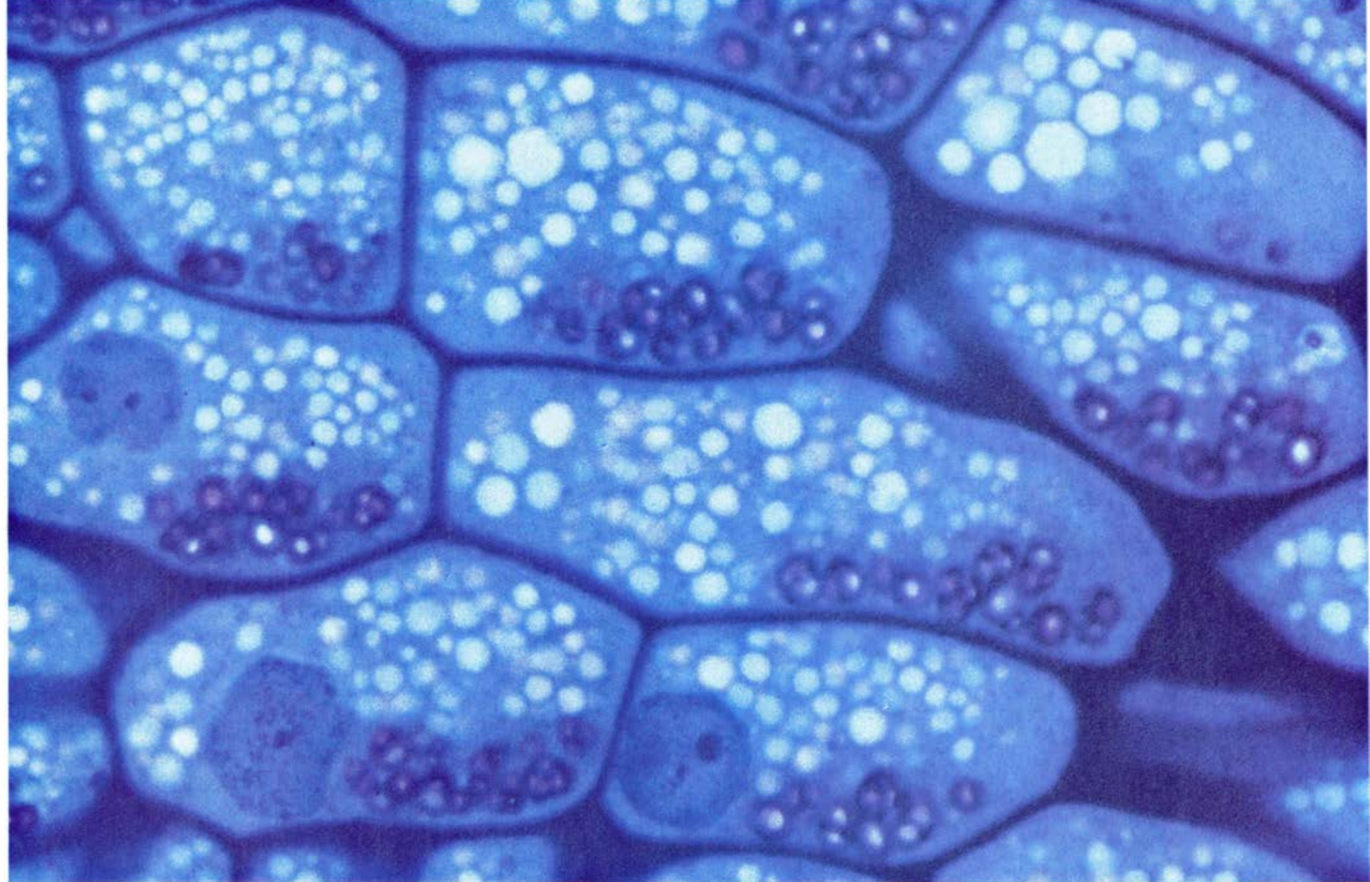
El gravitropismo se divide en tres fases: percepción, transmisión y respuesta. En las raíces, la percepción, o detección inicial de la gravedad, parece acontecer en la caliptra, o pilorriza, que es el medio milímetro terminal de aquéllas. La respuesta –la modificación de la pauta de crecimiento que provoca la curvatura hacia abajo– se produce ligeramente detrás de la caliptra, en la "zona de elongación", donde, como indica su nombre, se registra el alargamiento de las células. La transmisión, la fase intermedia (y la más misteriosa), incluye, casi con certeza, algún tipo de comunicación entre la caliptra y la zona de elongación, si bien la naturaleza exacta de la interacción entre esas dos zonas no ha empezado a descifrarse hasta muy recientemente.

Aunque se desconoce el mecanismo preciso de la percepción de la gravedad por parte de las raíces, ya Darwin advirtió que la caliptra constituía el lugar más probable de la misma. La caliptra, escribió el naturalista en 1881, "dotada de la facultad de dirigir los movimientos de las partes adyacentes, actúa a la manera del cerebro de un animal inferior; situado en el extremo anterior del cuerpo, recibe las impresiones de los órganos sensoriales y dirige los movimientos". Fue uno de los primeros investigadores en advertir que, cuando se seccionaba la caliptra, se suprimía la capacidad de la raíz para responder a la gravedad. Desde entonces, otros estudiosos han confirmado esa observación y han demostrado también que, remplazando la caliptra arrancada por otra, procedente de una raíz diferente, se recuperaba el gravitropismo.

Según se cree, la porción de la caliptra capaz de detectar la gravedad es la zona central, denominada columela; ésta consta de células ricas en amiloplastos densos, que son orgánulos repletos de gránulos de almidón. En las raíces orientadas verticalmente, los amiloplastos se sitúan en el extremo inferior de las células de la columela, hacia el ápice radicular. Segundos después de que las raíces reciban el estímulo gravitatorio, los amiloplastos de la columela abandonan su posición anterior y se sitúan a lo largo de lo que entonces es la nueva pared inferior de las células [*véase la figura 1*].

Muchas pruebas confirman que el desplazamiento de los amiloplastos constituye el primer paso de la detección de la gravedad. Por ejemplo, las raíces tratadas para que carezcan de amiloplastos no responden a la gravedad. En algunos casos, basta inclinar la planta durante sólo 12 segundos para que sepa que se la ha reorientado; los amiloplastos parecen ser los únicos orgánulos de la caliptra que exhiben un desplazamiento significativo en tan breve lapso. En raíces que no responden a la gravedad, porque se les ha seccionado la caliptra, la recuperación de la sensibilidad a la gravedad está directamente ligada a la formación y establecimiento de nuevos amiloplastos; las raíces desprovistas de caliptra recuperan la sensibilidad a la gravedad en un plazo de 14 a 22 horas, lo que tardan los nuevos amiloplastos en formarse e instalarse en ciertas células próximas al ápice de la raíz decapitada.

Si el desplazamiento de los amilo-



1. **CELULAS DE LA ZONA DE LA COLUMELA de la caliptra de la raíz que, según se cree, son capaces de detectar la gravedad. Cuando la raíz está en posición vertical (*arriba*), unos orgánulos densos denominados amiloplastos (*cuerpos oscuros con gránulos blancos*) se sitúan en el lado inferior de las células. Cuando la raíz se dispone en horizontal (*abajo*), la gravedad provoca el rápido desplazamiento de los amiloplastos hacia lo que entonces pasa a ser el lado inferior de las células. Ese fenómeno de sedimentación parece desencadenar una serie de acontecimientos que, en última instancia, curvan la raíz hacia abajo.**

plastos es, en efecto, el mecanismo por medio del cual la raíz percibe la gravedad, se trata probablemente del único paso de la respuesta gravitatoria en el que la gravedad empuja directamente algún objeto (en este caso los amiloplastos); en lo demás parece mediar la actividad química. Antes de comentarlas, dejemos constancia de que se ha descrito un mutante, desarrollado en el laboratorio, de un tipo de planta que carece de amiloplastos en su caliptra y, sin embargo, exhibe una respuesta gravitatoria casi normal. Lo cual sugiere que el gravitropismo puede darse también en ausencia de amiloplastos; o que tal vez los amiloplastos no fueran los detectores iniciales de la gravedad en las raíces o, por último, que, en ausencia de amiloplastos, las raíces detecten la gravedad activando un mecanismo alternativo todavía desconocido.

Cualquiera que sea la explicación del mecanismo perceptual, el efecto último de la detección de la gravedad —la curvatura de la raíz— deriva a todas luces del crecimiento asimétrico de la zona de elongación. Cuando la raíz se orienta en vertical, crece de forma uniforme. Por el contrario, cuando la colocamos en horizontal, el lado superior crece más que el inferior; el crecimiento más lento de la parte inferior curva la raíz hacia abajo.

En su empeño por descubrir el factor que altera directamente la pauta de crecimiento de la raíz estimulada por la gravedad, el autor y otros investigadores han analizado los cambios exactos que sufre el crecimiento de las porciones superior e inferior de la raíz. Se han considerado muchas posibilidades. Entre ellas: ¿se incrementa el ritmo de crecimiento de la cara superior, manteniéndose constante el de la cara inferior? ¿Baja el ritmo de crecimiento de la cara inferior y aumenta el de la superior? ¿Crece el ritmo de las dos caras, pero de forma más destacada en la superior, o por el contrario decrece en ambas caras, pero de forma más destacada en la cara inferior?

Amy J. Nelson, alumna de licenciatura que trabaja con uno de nosotros (Evans), estableció el modelo de crecimiento de una raíz de maíz estimulada por la gravedad. Dispuso plántulas en una habitación con una humedad ambiente uniformemente elevada, para reproducir las condiciones del crecimiento normal de la raíz. En este experimento, como en los que citaremos más adelante, las plántulas se prepararon en unas condiciones ambientales que descartaban los posibles efectos, sobre el crecimiento de la raíz, de una distribución no uniforme de la humedad, luz, nutrientes y temperatura; se tenía así la seguridad de que cualquier curvatura de la raíz correspondería exclusivamente a la gravedad. Nelson colocó la raíz de las plántulas, que es de color blanco, sobre un fondo también blanco y dispuso pequeñas motitas negras a lo largo de la superficie de la raíz, pegajosa por naturaleza. Una cámara de video enfocaba la raíz y enviaba las señales a un ordenador, que rastreaba el movimiento de las motas resultante del crecimiento de la raíz y calculaba el porcentaje del crecimiento de las diversas porciones de la raíz antes y durante la respuesta a la gravedad.

Nelson descubrió que el estímulo de la gravedad provocaba una reducción del ritmo de crecimiento tanto de la superficie superior de la raíz como de la inferior; observó, asimismo, que el mayor freno se producía a lo largo de la superficie inferior, a unos dos o tres milímetros por detrás de la caliptra. Otros investigadores, empleando métodos diferentes y vegetales distintos, han confirmado que el retardo del crecimiento en el lado inferior provoca la curvatura hacia abajo de las raíces estimuladas por la gravedad.

¿Cómo explicar ese freno del crecimiento? La multiplicación de las células vegetales está controlada principalmente por hormonas; cabe suponer, por tanto, que en el lado inferior de la zona de elongación se registre un aumento de los niveles de alguna hormona inhibidora del crecimiento. Una hipótesis que pretende explicar el gravitropismo de la raíz sugiere que el inhibidor en cuestión es el ácido abscísico, hormona natural de las raíces vegetales. Cuando se aplica ese ácido en grandes cantidades a la superficie externa de la raíz, se absorbe e inhibe el crecimiento. En las raíces de ciertas plántulas de maíz que no muestran gravitropismo en la oscuridad, la iluminación de la caliptra induce esa propiedad al cabo de una hora, durante la cual, según se ha comprobado, sube la tasa de síntesis de ácido abscísico en la caliptra.

A pesar de esos datos, otros más recientes nos han llevado a concluir que la hipótesis del ácido abscísico es incorrecta. Uno de nosotros (Evans) ha demostrado que esa hormona inhibe el alargamiento de la raíz sólo cuando se

2. PORCION TERMINAL de la raíz, donde se registra el fenómeno del gravitropismo, o geotropismo. La caliptra presenta en su centro las células de la columela, capaces de detectar la gravedad. En la zona de elongación, o de crecimiento, que a menudo mide hasta cinco o seis milímetros, se produce la curvatura gravitrópica. La zona meristemática intermedia constituye el lugar de origen de las células técnicas de la raíz.

aplica en concentraciones significativamente más altas de las que se consideran propias de las condiciones naturales.

Y lo que quizás encierre mayor interés: otro de nosotros (Moore) ha descubierto que las raíces de las plántulas de maíz cultivadas en presencia de un inhibidor de la síntesis del ácido abscísico, y que por consiguiente presentan niveles indetectables de ácido, se curvan hacia abajo en respuesta al estímulo de la gravedad. También las raíces de un mutante de maíz incapaz de sintetizar ácido abscísico responden a la gravedad. Es más, uno de los autores (Evans) ha observado que las raíces sumergidas en una solución muy concentrada de ácido abscísico se curvan hacia abajo en respuesta al estímulo gravitatorio. Este último dato reviste suma importancia, pues es poco probable que el ligero gradiente del nivel de la hormona inducido por la gravedad pudiera, por sí solo, provocar la curvatura cuando la raíz entera está sumergida en niveles de saturación de dicha sustancia.

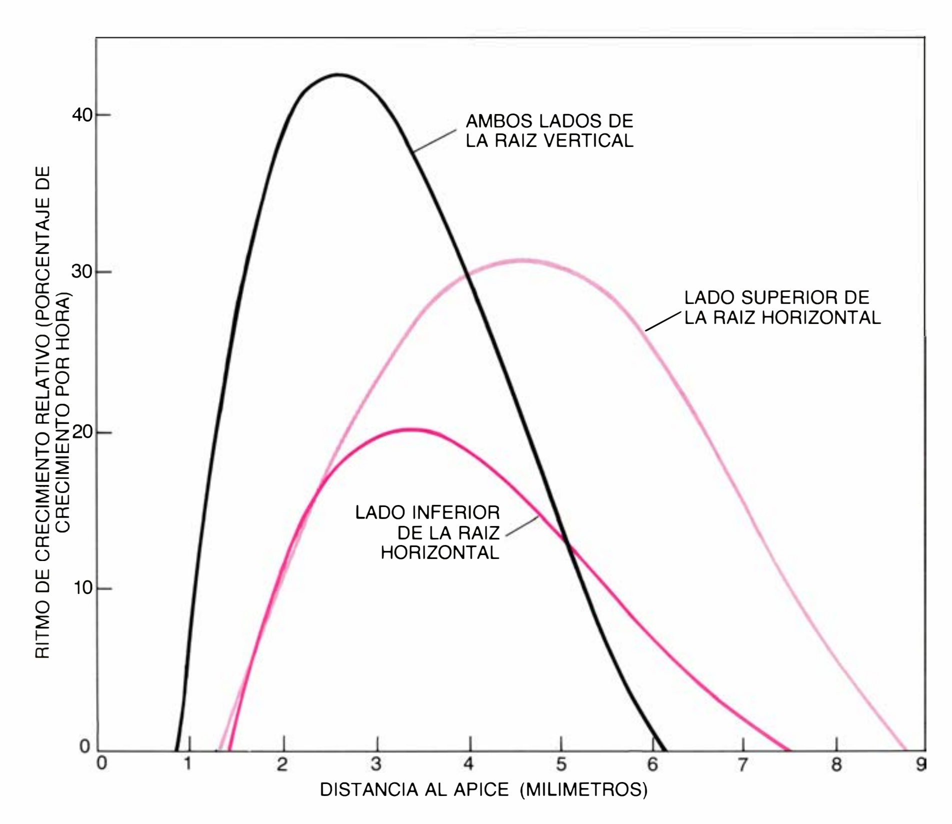
Pruebas concluyentes sugieren que la hormona que controla la curvatura de la raíz tras un estímulo gravitatorio es la auxina que, al igual que el ácido abscísico, se da de forma natural en la raíz y es un poderoso inhibidor de su crecimiento, incluso a concentraciones de 100 a 1000 veces inferiores a las de actividad del ácido abscísico. En raíces insensibilizadas a la gravedad por extirpación de la caliptra, la aplicación de pequeñas dosis de auxina a uno de los lados de la zona de elongación puede causar la curvatura de la raíz hacia ese lado, lo que parece mostrar que un incremento sutil, fisiológico, de auxina en el lado inferior de una raíz dispuesta en horizontal podría bastar para provocar la curvatura.

Después de aplicar uniformemente auxina radiactiva en la zona de elongación de la raíz estimulada por la gravedad, la hormona se movió hacia el lado inferior de la raíz; se diría que al menos cierta cantidad de auxina natural se concentra así en la parte inferior de la zona de elongación. Más aún, los productos químicos que entorpecen el movimiento de la auxina de una célula radical a otra –y que por tanto habrían de impedir el aumento de auxina en la zona habitual de curvatura– suprimen la capacidad de la raíz para curvarse en respuesta a la gravedad.

Para demostrar de forma más rotunda que la auxina es la responsable de la curvatura de las raíces estimula-



3. ESTIMULO GRAVITATORIO ejercido sobre raíces de maíz desprovistas de caliptra (*arriba*) y con la caliptra intacta (*abajo*). Demuestra la importancia de esa estructura en el gravitropismo. Cuando se elimina la caliptra, la raíz crece de forma normal, pero no se curva hacia abajo al disponerla en horizontal, es decir, cuando se la somete al estímulo gravitatorio. Por el contrario, la raíz con la caliptra intacta sí se curva.



4. COMPARACION DEL RITMO DE CRECIMIENTO en distintos puntos de una raíz de maíz orientada en vertical y de otra horizontal, que revela parte del mecanismo por medio del cual las raíces responden a la gravedad. Las raíces verticales crecen de forma simétrica en la zona de elongación, mientras que las horizontales lo hacen asimétricamente y en menor cuantía. En las raíces dispuestas en horizontal, el lado inferior crece más despacio que el superior, de forma que la raíz se curva hacia abajo. Según un modelo del mecanismo gravitrópico, esa reducción asimétrica del crecimiento resulta de una redistribución desigual de la auxina, hormona vegetal que, según se sabe, inhibe el crecimiento de la raíz. Sugiere también ese mismo modelo que el movimiento de la auxina podría estar sometido al control de iones calcio de la caliptra.

das por la gravedad, debe comprobarse directamente que la auxina que contiene la raíz de forma natural se concentra en la porción inferior de la zona de elongación justo antes de desencadenarse la curvatura gravitrópica. Carecemos todavía de pruebas en este sentido.

Si la disposición de los amiloplastos en la columela de la caliptra constituye el mecanismo responsable de la percepción de la gravedad, y si al incremento de auxina en el lado inferior de la zona de elongación cabe atribuir, en última instancia, la respuesta de la raíz, ¿qué relación engarza esos dos acontecimientos? Es decir, ¿en qué consiste la misteriosa fase de transmisión del gravitropismo?

A partir de datos reunidos recientemente, creemos que la ordenación de los amiloplastos desencadena la liberación de iones calcio (Ca^{++}) de orgánulos citoplasmáticos situados en el lado inferior de las células de la columela. A su vez, el calcio liberado activa el sistema de transporte descendente de calcio y auxina de una célula a otra hacia la porción inferior de la caliptra. El calcio situado en el fondo de la caliptra facilita entonces el movimiento de la auxina, desde la parte posterior de la caliptra hacia el lado inferior de la zona de elongación.

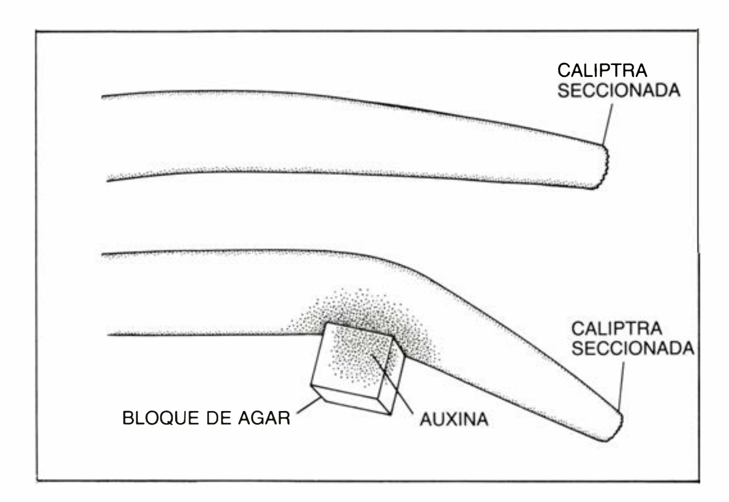
Las primeras sospechas de que la liberación y movimiento del calcio almacenado quizá desempeñaran un papel importante en el inicio de la fase de transmisión del gravitropismo las provocó la publicación, en las décadas de 1960 y 1970, de varios artículos sobre el aparente movimiento del calcio de célula en célula durante la respuesta de los brotes a la gravedad. En esos experimentos se demostraba que tales iones emigraban hacia la superficie superior del brote antes de que éste se curve hacia arriba.

Para verificar nuestra hipótesis, Konrad M. Kuzmanoff y Timothy J. Mulkey, ambos alumnos de licenciatura que trabajaban con uno de nosotros (Evans), aplicaron EDTA (que se une al calcio y lo inmoviliza) a las caliptras de raíces de maíz. Sorprendentemente, las raíces tratadas con EDTA, cuyo crecimiento siguió siendo normal, perdieron toda sensibilidad a la gravedad. Eliminando el EDTA y remplazándolo por calcio, se recuperaba la capacidad de respuesta de la raíz a la gravedad. Kuzmanoff y Mulkey aportaron, de ese modo, pruebas concluyentes de que el calcio libre y móvil de la caliptra resultaba esencial para el gravitropismo radicular. Su observación se ha visto posteriormente confirmada por otros estudios: diversos tratamientos, que impiden el movimiento del calcio, anulan todos ellos la respuesta gravitrópica de la raíz.

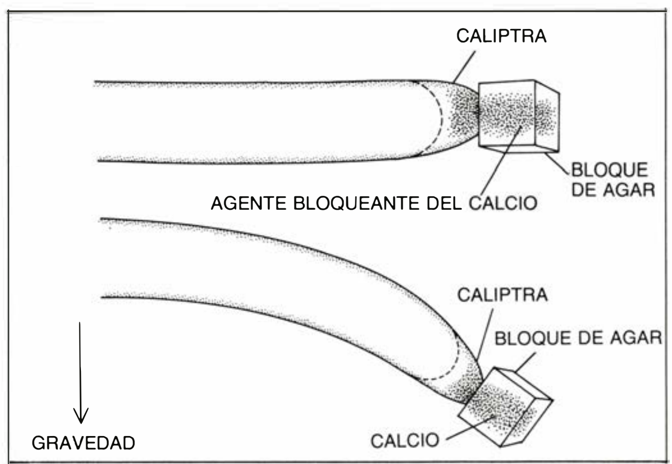
Partiendo del punto en que lo dejaron Kuzmanoff y Mulkey, June S. Lee, a la sazón de visita en la Universidad estatal de Ohio procedente de la Universidad nacional Kang Reung de Corea, determinó la dirección probable del movimiento del calcio en el interior de una raíz estimulada por la gravedad. Estudió primero raíces no estimuladas por la gravedad y descubrió que el calcio ejercía una importante influencia sobre la dirección de crecimiento. Al aplicar calcio a la caliptra de forma desigual, la raíz se curvaba hacia la zona donde la concentración de calcio era mayor. De hecho, cuando aplicaba calcio de modo persistente a un lado de la caliptra de una raíz orientada verticalmente, la raíz llegaba a dar un giro entero de 360 grados. Puesto que se sabía que las raíces estimuladas por la gravedad se curvan hacia abajo, Lee concluyó que tal curvatura podía derivar de un exceso de calcio en la parte inferior de la caliptra, depositado quizá por el movimiento hacia abajo dichos iones.

Lee demostró luego que, en efecto, el calcio podía descender por el interior de la caliptra. Aplicó uniformemente calcio radiactivo a las raíces del maíz, orientó las raíces en vertical u horizontal y midió el movimiento de los iones radiactivos. En las raíces orientadas verticalmente, los iones radiactivos de calcio mostraban una distribución uniforme. En las raíces horizontales, por el contrario, el calcio radiactivo se corría hacia el lado inferior de la raíz. Tal movimiento direccional del calcio resultaba particularmente intenso en la caliptra radicular.

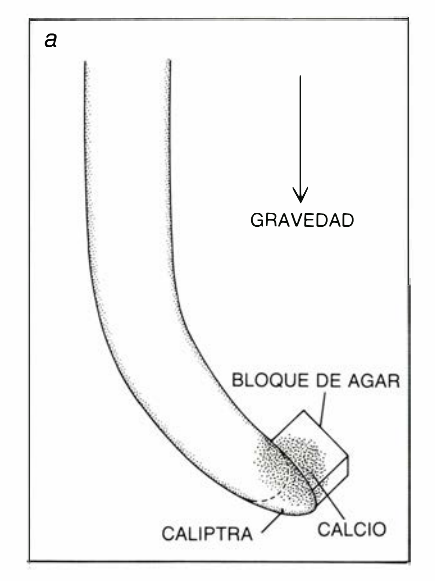
Los resultados de una línea de investigación muy distinta corroboran la hipótesis de que el calcio desciende en las raíces estimuladas por la gravedad. Colocando microelectrodos especiales próximos a una raíz de mastuerzo orientada en vertical, H. M. Behrens y sus colaboradores, en la Universidad de Bonn, demostraron que a lo largo de la superficie de la raíz discurría una corriente eléctrica simétrica, que penetraba en el interior cerca del ápice. Al disponer la raíz en horizontal, comprobaron que la corriente se hacía asi-

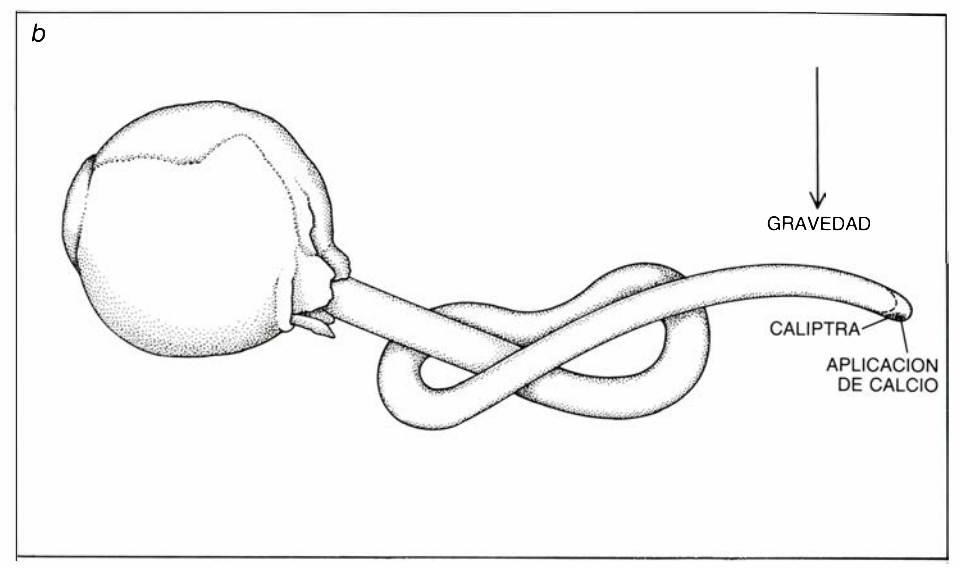


5. RAICES DECAPITADAS de plantitas de maíz, por medio de las cuales se demuestra que la distribución desigual de la auxina podría ser la causa del crecimiento asimétrico en la zona de elongación de las raíces estimuladas por la gravedad. La eliminación de la caliptra (*arriba*) determina la pérdida de sensibilidad a la gravedad, pero cuando se aplica auxina embebida en un bloque de agar a uno de los lados de la raíz decapitada (*abajo*), ésta crece más despacio por ese lado y, en última instancia, por el punto de aplicación de la hormona.



6. APLICACION de un agente bloqueante del calcio en la caliptra de una raíz de maíz. Determinaba el crecimiento rectilíneo de la raíz al disponerla en horizontal (*arriba*): el agente bloqueante evitaba la redistribución del calcio en respuesta a la gravedad. Al sustituirse el bloque de agar con agente bloqueante por otro que contenía calcio (*abajo*) se restituía el gravitropismo. Estos resultados, obtenidos por K. M. Kuzmanoff y T. J. Mulkey, indican que la presencia de calcio en la caliptra resulta esencial para que la raíz responda a la gravedad.





7. APLICACION DE CALCIO a las raíces de maíz. Determina la curvatura de las raíces hacia la zona de aplicación. Al poco de colocarse en el lado derecho de la caliptra de una raíz vertical un bloque de agar con calcio (*a*), la raíz se curvaba hacia la derecha. De forma similar, en experimentos a largo plazo en los que se cambiaba periódicamente el lugar de aplicación del calcio a la caliptra (*b*), se generaban varias curvas, todas ellas fruto del arqueamiento de la raíz hacia el calcio. Esos resultados indican que la distribución desigual del calcio en la caliptra de una raíz estimulada por la gravedad —y especialmente un exceso del mismo en el lado inferior de la caliptra, instado por los amiloplastos— contribuye a la curvatura hacia abajo que se registra en la zona de elongación.

métrica; en particular, la corriente del lado superior de la caliptra emergía del ápice, mientras que la corriente del lado inferior penetraba en él. Los datos parecían apuntar a que la corriente respondía a un flujo de iones hidrógeno (H^+).

Thomas Björkman y A. Carl Leopold, de la Universidad de Cornell, confirmaron recientemente esas observaciones en ensayos efectuados con raíces de maíz. Comprobaron que, a los dos o seis minutos de poner horizontales las raíces se alteraba el sentido de la corriente en la caliptra: ascendía y emergía por la parte alta. Björkman y Leopold supusieron que el flujo ascendente de iones hidrógeno reflejaba indirectamente un flujo de iones calcio hacia la parte baja de la caliptra; para mantener el equilibrio eléctrico, la caliptra compensaba el desplazamiento del calcio con un flujo inverso de otras partículas portadoras de carga positiva, así iones hidrógeno. (La intensidad de la corriente ascendente medida por Björkman y Leopold concuerda con nuestras propias estimaciones sobre el volumen de calcio que se desplaza a la parte inferior de la caliptra.) Si la corriente ascendente es, en efecto, un reflejo de la migración de calcio, la duración del movimiento sugiere que ese avance resulta de la reordenación de los amiloplastos; el movimiento del calcio sigue a esa reordenación y precede a la curvatura hacia abajo de la raíz.

No queda claro cómo la nueva ordenación de los amiloplastos provoca el movimiento del calcio, ni cómo éste se concentra a lo largo del lado inferior de la caliptra; G. Pickard, de la Universidad de Washington en St. Louis, ha propuesto una hipótesis razonable, coherente con los resultados de Björkman y Leopold. En las células de la columela, los amiloplastos que se desplazan tras el estímulo de la gravedad caen sobre el retículo endoplasmático, un complejo de membranas y vesículas ricas en calcio. Pickard sugiere que la presión de los amiloplastos sobre el retículo endoplasmático provoca la salida de iones calcio, elevándose localmente el nivel de calcio a lo largo del lado inferior de las células.

Nos parece oportuno agregar algo a ese modelo. Sospechamos que, cuando el nivel del calcio supera cierto umbral, los iones activan la calmodulina: una pequeña proteína que activa muchas enzimas, importantes en el funcionalismo celular, y ello no sólo en los vegetales, sino también en los animales e incluso en algunos microorganismos. Una vez activada por el calcio, la calmodulina estimula el movimiento de éste mediante la puesta en marcha de bombas de calcio: grandes enzimas que, según se cree, atraviesan la membrana celular. Las bombas de calcio del lado inferior de las células excretan el exceso del ion que se acumula en el lado inferior de la caliptra.

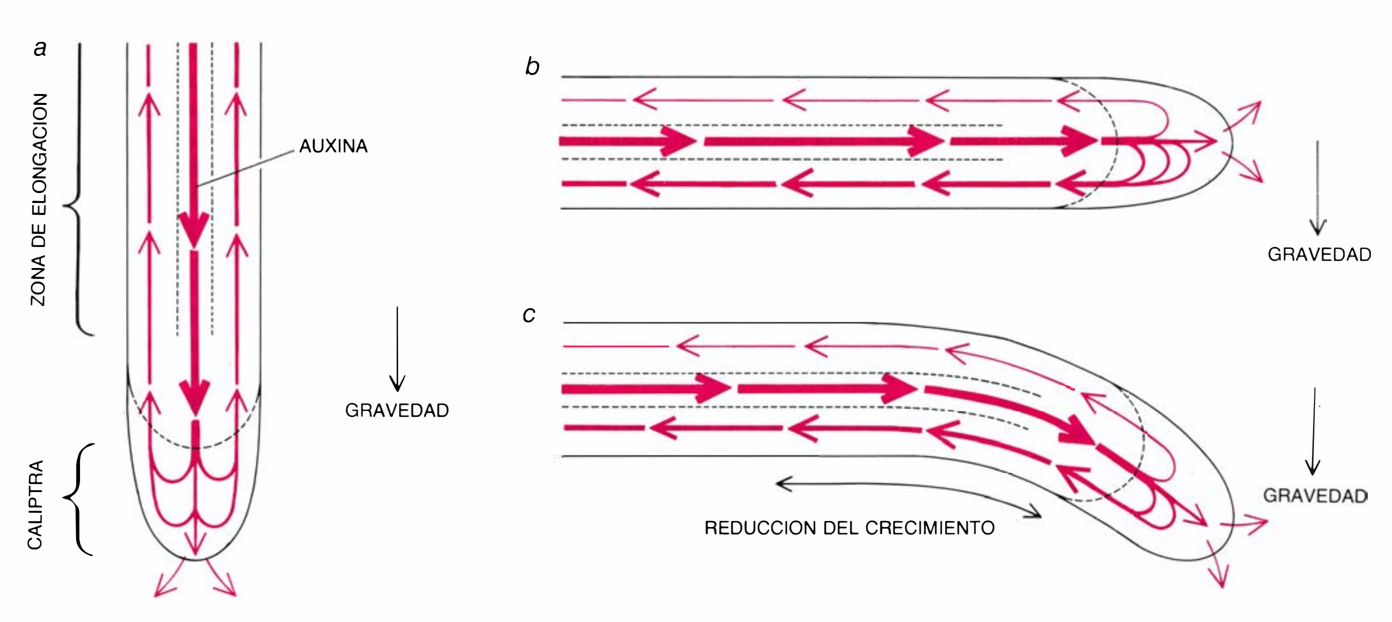
Según parece, la caliptra almacena la calmadulina que requiere este modelo. Charles L. Stinemetz, alumno de licenciatura que trabaja con uno de nosotros (Evans), comprobó su presencia en las raíces de maíz y demostró que la concentración de calmodulina era cuatro veces superior en la caliptra que en la zona de elongación. Stinemetz encontró también indicios de que la calmodulina que se halla en la caliptra quizá resulte necesaria para el gravitropismo radicular, lo que confiere mayor credibilidad al supuesto papel de esa enzima. Cuando aplicó inhibidores de la calmodulina a la caliptra, se retrasó de forma notable la curvatura gravitrópica de la raíz.

Antes de abordar los restantes pasos de la respuesta gravitrópica –el movimiento descendente de la auxina en la caliptra y el movimiento realzado por el calcio de la auxina hacia el lado inferior de la zona de elongación– convendrá describir el patrón usual de movimiento por la raíz que se le atribuye a la auxina. En las raíces orientadas verticalmente, la auxina se dirige hacia la caliptra a través de la porción central de la zona de elongación. Parte de la auxina que se dirige a la caliptra lo hace metabolizada o pasa, por el ápice, al medio de crecimiento. A la vez, otra parte de la auxina se desvía hacia los lados de la caliptra, donde vuelve a ascender, hacia el interior de la zona de elongación, vehiculada por células situadas a lo largo del margen externo de la raíz [*véase la figura 8*]. La simetría del movimiento explica que el crecimiento de las raíces situadas en posición vertical proceda en línea recta.

En las raíces estimuladas por la gravedad se altera el modelo de movimiento de la auxina en la caliptra. Basándonos en datos recientes reunidos por uno de nosotros (Hasenstein), proponemos que la calmodulina activada por el calcio en las células de la columela no sólo pone en marcha las bombas de calcio de la porción inferior de

PARED CELULAR
MEMBRANA CELULAR
AMILOPLASTO
AUXINA
CALMODULINA INACTIVA
1
CALCIO
3
CALMODULINA ACTIVADA
2
4a
4b
RETICULO ENDO-PLASMATICO
BOMBA DE CALCIO
5a
5b
BOMBA DE AUXINA

8. **MECANISMO PROPUESTO** por los autores para enlazar, en la caliptra de las raíces estimuladas por la gravedad, la sedimentación de los amiloplastos y el movimiento descendente de los iones calcio (*puntos de color*) y de la auxina (*puntos negros*). Se apoya en la enzima calmodulina, un importante activador de enzimas en las células vegetales y animales. Cuando se altera la posición de una raíz, los amiloplastos de las células de la columela caen hacia el lado basal de las células y establecen contacto con el retículo endoplasmático, un complejo de membranas ricas en calcio (*1*). La presión ejercida sobre el retículo endoplasmático induce al complejo de membranas a liberar calcio al citoplasma circundante (*2*). Cuando el nivel de calcio en el citoplasma del lado inferior de la célula alcanza cierto umbral, se une a una calmodulina activada (*3*), que a continuación activa, en la membrana celular de ese lado, dos tipos de enzimas: una bomba de calcio (*4a*) y una bomba de auxina (*4b*). Las bombas de calcio transportan el exceso de ese elemento al interior de la pared celular (*5b*). El calcio y la auxina emigran luego, por diferentes mecanismos, a través de las células subyacentes, hacia el lado inferior de la caliptra. (Los dibujos son obra de Patricia J. Wynne.)



9. **PAUTA DE MOVIMIENTO** de la auxina (*flechas*) en la raíz. Cambia al someterse la raíz al estímulo gravitatorio. En una raíz vertical (*a*), la auxina avanza hacia la caliptra desde la zona de elongación, a través de la zona central. Según se cree, después de entrar en la caliptra, parte de la hormona se desplaza a lo largo de la caliptra y hacia el exterior a través del ápice; parte se desvía hacia los lados y luego regresa de forma simétrica a la zona de elongación. Cuando la raíz se coloca en posición horizontal (*b*), el patrón de flujo de la auxina se hace asimétrico. Los autores proponen que gran parte de la auxina que entra en la caliptra desciende hacia el lado inferior de la misma, donde el calcio allí acumulado incrementa la tasa de regreso de la auxina a la zona de elongación. El exceso de auxina que se acumula en las células de la mitad inferior de la zona de elongación inhibe el crecimiento, provocando así la curvatura de la raíz (*c*).

la membrana celular, sino también otras bombas de auxina, cuya presencia en las membranas de las células vegetales es un hecho comprobado. Creemos que esas bombas transportan la auxina hasta el exterior, a través del lado inferior de las células de la columela; y así, gran parte de la auxina que entra en la caliptra procedente de la zona de elongación se dirige hacia abajo, al lado inferior de la caliptra, en vez de dividirse simétricamente entre los lados superior e inferior. Proponemos también que la elevada concentración de calcio de las células situadas a lo largo del lado inferior de la caliptra acelera el ritmo de retorno de la auxina, de la parte inferior de la caliptra al lado inferior de la zona de elongación.

Planteemos de nuevo la pregunta formulada hace más de un siglo: ¿mediante qué mecanismo responde a la gravedad una raíz orientada horizontalmente? A lo que parece, la gravedad atrae los amiloplastos situados en las células de la columela, en el interior de la caliptra. Al caer sobre el retículo endoplasmático, provocan una elevación de los niveles de calcio en el citoplasma, lo que activa la calmodulina, que a su vez activa las bombas de calcio y auxina de la membrana del lado inferior de las células. Las bombas expulsan de la célula el calcio y la auxina a través de la porción inferior de la célula, generándose, en última instancia, una acumulación de calcio y auxina en el lado inferior de la caliptra. El aumento de la concentración de calcio en esa zona incrementa la carga de auxina en la ruta que la lleva de regreso hacia el lado inferior de la zona de elongación. Allí la auxina inhibe el crecimiento y provoca la curvatura de la raíz hacia abajo, en el sentido de la atracción gravitatoria.

No sorprende que el modelo de crecimiento descedente que el gravitropismo desencadena conduzca, casi siempre, a la raíz hacia un aporte de humedad y nutrientes. Nuestros últimos hallazgos, y los de otros botánicos, confirman la hipótesis de Darwin según la cual ese comportamiento de autoconservación de la raíz (o de la "radícula", en sus palabras) se controla por medio de la caliptra. Los investigadores del gravitropismo y de otros comportamientos de la raíz no van muy descaminados cuando se hacen eco de la afirmación que hizo Darwin en 1881: "No hay estructura más maravillosa en las plantas, en lo que se refiere a su función, que el ápice de la radícula".

Hidronaves de tracción humana

En búsqueda de velocidades cada vez mayores, las embarcaciones de carreras propulsadas por ocho remeros podrían ceder el paso a nuevas hidronaves. Una de éstas fue diseñada y construida por los autores del artículo

Alec N. Brooks, Allan V. Abbott y David Gordon Wilson

Hasta hace poco, los cascos estilizados de las barcas de remos de competición, popularizados por los Juegos Olímpicos, las carreras en el río Támesis, las del Cantábrico en España y otras regatas de remo celebradas a lo largo y ancho de todo el mundo, eran las hidronaves de tracción humana más rápidas. La más rápida de todas, impulsada por una tripulación de ocho remeros, alcanza velocidades de 12 nudos sobre un recorrido típico de 2000 metros. (Un nudo es aproximadamente igual a medio metro por segundo.) Las hidronaves de tracción humana que no están sujetas a las restricciones arbitrarias de las competiciones de remo reguladas oficialmente igualan o sobrepasan esas prestaciones. Los diseñadores de estas naves no convencionales están prescindiendo de los remos y aprovechando las ventajas de las modernas hélices de alto rendimiento. Están abandonando incluso los cascos, en búsqueda de caminos innovadores para reducir la resistencia al movimiento que el agua ejerce sobre ellos.

De hecho, dos de los autores (Brooks y Abbott) han desarrollado precisamente una hidronave de tracción humana de este tipo, para batir las mejores marcas. La nave, el *Pez Volador II*, se maneja como una bicicleta. Tiene dos perfiles hidrodinámicos, o alas subacuáticas, y una hélice de alto rendimiento. Permite a su único tripulante cubrir una distancia de 2000 metros bastante antes que un remero en un casco y ha obtenido una velocidad máxima de 13 nudos sobre distancias cortas.

Olvidando su diseño –tanto si es un elemento flotante tosco, propulsado por el batir de pies bajo el agua, una balsa de madera empujada por perchas, una canoa propulsada mediante paletas o una chalupa impulsada por el movimiento de los remos– cada hidronave debe soportar cuatro fuerzas básicas: peso, sustentación, empuje y resistencia. El peso y la sustentación son las fuerzas más sencillas de entender. El peso es, simplemente, la fuerza gravitatoria que tira hacia abajo la nave y sus ocupantes; la sustentación es la fuerza que actúa hacia arriba, contrarrestando el peso. Puesto que una barca no experimenta ninguna aceleración vertical, la sustentación es igual al peso.

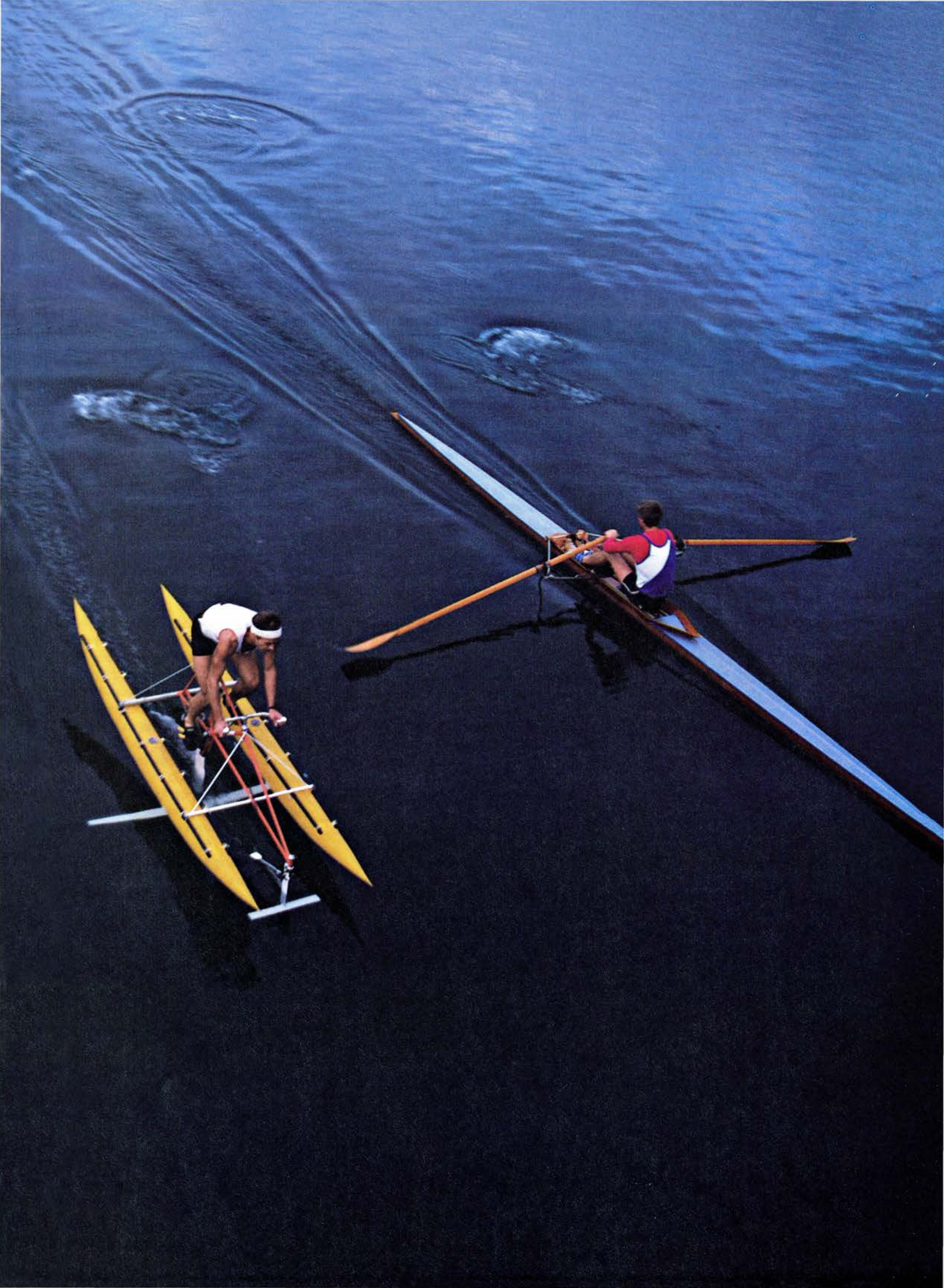
Para la mayoría de hidronaves, la sustentación se genera por la flotabilidad: el desplazamiento de agua por el casco de la nave. La sustentación es igual al peso de agua desplazado y opera incluso en ausencia de movimiento. Adicionalmente, muchas embarcaciones de alta velocidad aprovechan la sustentación dinámica que se produce cuando la barca se mueve a través del agua. Un ejemplo común de sustentación dinámica es el planeo: cuando el fondo del casco desvía continuamente el agua hacia abajo, se produce sustentación como fuerza de reacción. Una barca que confíe en el planeo para producir la mayor parte de la sustentación necesaria avanzará a mayor altura en el agua –a menudo sobre la superficie– y requerirá menos flotabilidad. Hasta hace muy poco, los diseñadores de hidronaves de tracción humana no habían logrado incorporar con éxito la sustentación dinámica en sus vehículos.

Llamamos empuje a la fuerza (producida por las acciones del tripulante en el caso de una hidronave de tracción humana) que propulsa la nave. La resistencia es la fuerza que, por definición, actúa en dirección opuesta al movimiento de la nave. Si ésta avanza a velocidad constante, el empuje es igual a la resistencia. En resumen, a velocidades constantes, la sustentación equilibra el peso y el empuje equilibra la resistencia.

Para traducir un determinado esfuerzo humano en velocidad, importa, sobre todo, minimizar la resistencia. Una manera obvia de disminuir la resistencia es aligerar el peso de la barca. Una vez que la barca comienza a moverse, su necesidad de sustentación representa casi siempre un aumento en la resistencia. Aligerando el peso de la barca, la sustentación requerida se reduce y, por tanto, la resistencia asociada con la sustentación disminuye. Puesto que el tripulante de la nave no suele ser un individuo pesado (partiremos de la suposición de que se trata de individuos saludables y atléticos), la reducción de peso debe buscarse fundamentalmente en el propio vehículo.

Los esfuerzos dedicados a este fin han conducido a cascos de competición que pesan sólo una pequeña fracción del peso del tripulante: una relación similar a la de una moderna bicicleta de carreras y su conductor. En el pasado, las barcas se hacían de cedro, abeto y caoba, y se aligeraban adelgazando sus cascos (el propio término "cascarón" que se les aplica se debe al fácil taladro de un casco de madera). En los años 50 se ensayó con cascos experimentales que tenían una superficie plástica de fibra de vidrio reforzada y, para finales de los 60, las barcas basadas en materiales compuestos de uso comercial habían conquistado el mercado de las embarcaciones de madera en el mundo del remo. Hoy, los cascos de madera se es-

1. ENTRE LAS MAS RAPIDAS hidronaves de tracción humana están las embarcaciones de competición convencionales y el atípico vehículo creado por los autores del artículo, el *Pez Volador II*. El casco que se muestra aquí, tripulado por el cuatro veces olímpico John Van Blom, fue construido por Alfred Stämpfli AG, de Suiza. El *Pez Volador II*, conducido por uno de los autores (Abbott), se impulsa mediante una hélice movida a pedal y se mantiene con dos hidroperfiles, o alas sumergidas, cuando compite. Los flotadores están, en realidad, sobre el agua y tienen por misión aguantar la nave cuando ésta avanza a poca velocidad.



tán convirtiendo en una rareza. Materiales compuestos muy elaborados, constituidos por resinas reforzadas con fibras de un polímero o grafito, han reducido el peso de la más ligera embarcación monoplaza a menos de 10 kilogramos.

Reducido ya el peso de una embarcación de carreras a su mínimo práctico, la atención del ingeniero debe dirigirse hacia otras formas de minimizar la resistencia. Las embarcaciones tienen lo que se ha dado en llamar cascos de desplazamiento: casi toda su sustentación se produce por la flotabilidad del casco. Los cascos de desplazamiento tienen la propiedad única de que su resistencia tiende a cero cuando su velocidad a través del agua tiende, asimismo, a cero. Por tanto, a muy bajas velocidades, los vehículos con casco de desplazamiento presentan una resistencia extremadamente baja y están entre los más eficientes de todos los vehículos. Sin embargo, las embarcaciones de competición no operan a bajas velocidades.

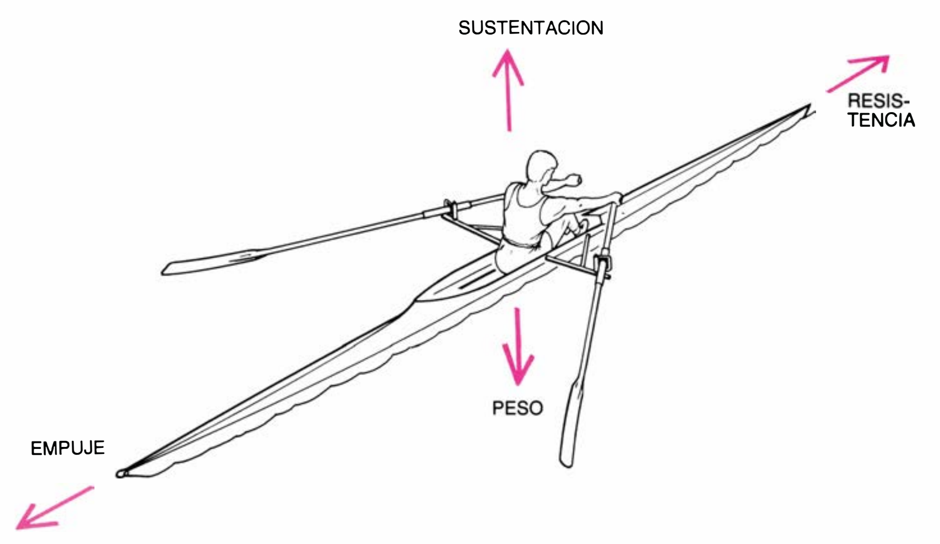
A medida que aumenta la velocidad de una embarcación, su resistencia crece espectacularmente debido, en parte, a la formación de olas que parten desde la proa y desde la popa. La energía invertida en producir estas olas se manifiesta en forma de resistencia de ola. La resistencia de ola crece rápidamente con la velocidad, pero de forma irregular, puesto que la ola de proa puede interactuar constructivamente con la ola de popa (de forma que las olas estén en fase y se refuercen una a otra) o hacerlo destructivamente (de suerte que las olas estén fuera de fase y tiendan a cancelarse mutuamente) al tomar velocidad la nave. A la llamada velocidad de casco, la proa está en la cresta y la popa está en el vientre de una misma ola; a su paso a través del agua, el casco ha creado una montaña de agua, a través de la cual debe pasar la embarcación. En este punto, se necesita un enorme gasto de potencia para incrementar la velocidad del barco. Como la potencia humana no puede suministrar el esfuerzo requerido, la velocidad del casco actúa de límite efectivo de velocidad de un vehículo de tracción humana con casco de desplazamiento.

La velocidad del casco es proporcional a la raíz cuadrada de la longitud de la línea de flotación de una barca. Las embarcaciones de tracción humana que tienen largos cascos de desplazamiento dependen menos de la resistencia de ola que otras barcas que tienen cascos más cortos y la misma flotabilidad. Por otro lado, para una flotabilidad dada, los cascos largos y esbeltos tienen más superficie mojada que los cortos y anchos. Cuanto mayor sea el área de la superficie mojada, mayor será la resistencia causada por la fricción del agua cuando fluye a lo largo del casco: a ésta se la conoce por resistencia de fricción superficial. Así pues, a medida que una barca se hace más estilizada, la resistencia de ola disminuye; pero la resistencia de fricción superficial se convierte, entonces, en un problema.

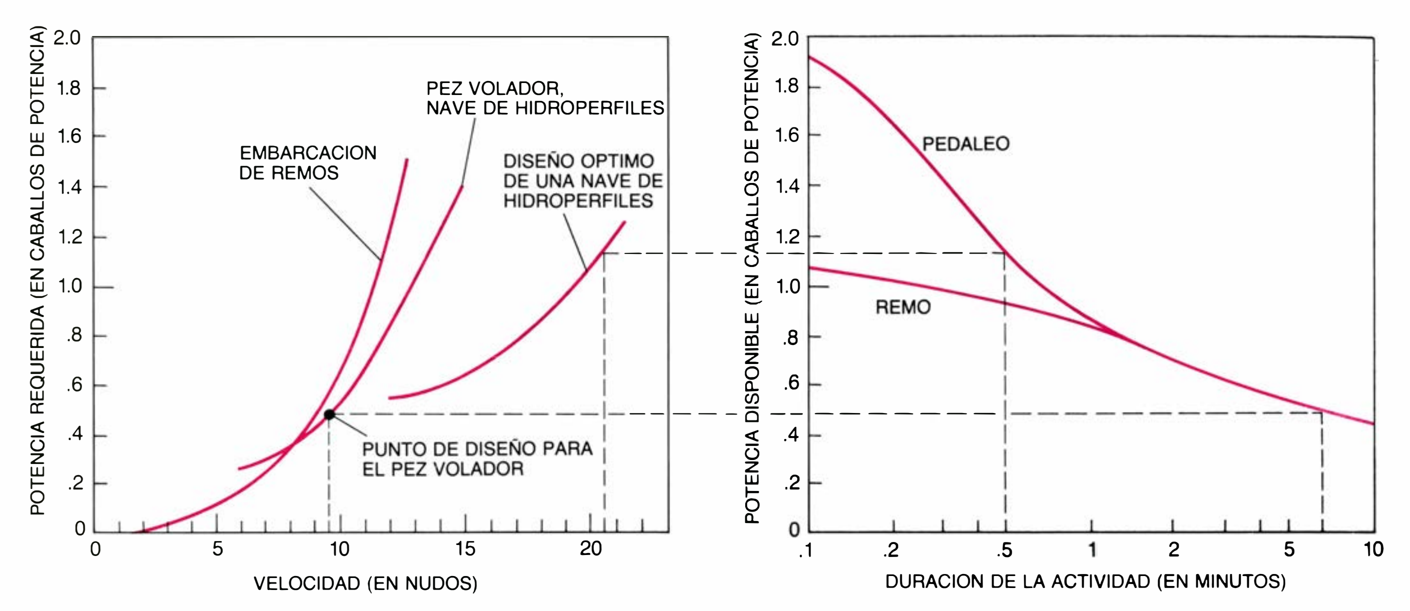
Un casco diseñado para barcas rápidas debe, por tanto, optimizar la forma de modo que haga mínima la suma de la resistencia de ola y la resistencia de fricción. Se proyectan para competir en carreras de seis o siete minutos, a una potencia de alrededor de medio caballo por remero (un caballo de potencia viene a equivaler a unos 750 watt). Las razones óptimas de longitud a anchura resultantes para estas naves estilizadas superan el valor de 30. Un cascarón monoplaza, por ejemplo, tiene una longitud de entre ocho y nueve metros y una anchura de no más de treinta centímetros. Esto conduce a que la forma óptima de un cascarón resulte de una distribución sesgada de la resistencia a las velocidades de carrera: el 80 por ciento de la resistencia que actúa sobre el cascarón procede de la fricción superficial, mientras que el 20 por ciento se debe a la producción de olas.

Dado que la fricción superficial es la fuente dominante de la resistencia que actúa sobre la embarcación, a velocidades de competición, obtendremos una reducción sustancial de la resistencia si rebajamos la fricción superficial. La fricción superficial se crea en una delgada capa de agua, la capa límite, que fluye a lo largo del casco de la embarcación. Existen dos tipos fundamentales de capa límite: una laminar, en la cual el flujo es regular y estacionario, y otra, turbulenta, en la cual el flujo es caótico y no estacionario. Las capas límite laminares oponen bastante menos resistencia de fricción superficial que las capas límite turbulentas. La capa límite de una cáscara es laminar en la proa, pero, a una corta distancia por detrás, sobreviene una transición a flujo turbulento. La resistencia se rebaja significativamente si se retrasa la transición, aumentando el área del flujo laminar sobre el casco.

Un método para extender la capa límite laminar, aplicado en algunos vehículos subacuáticos especializados, es el de inyección de polímeros de cadena larga (denominados a veces aguas lubricantes) en la capa límite, cerca de la proa. No es probable que las organizaciones que regulan las carreras autoricen esta práctica en la competición, aunque sólo fuera por la sencilla razón de que contamina el agua. Una solución similar que, sin embargo, podría permitirse, consistiría en cultivar cui-



2. CUATRO FUERZAS BASICAS intervienen en el diseño de embarcaciones del tipo de la aquí dibujada: un casco de competición. Son: el peso, la sustentación, el empuje y la resistencia. El peso es la fuerza gravitatoria que actúa sobre la barca y sus tripulantes. La sustentación viene generada por la flotabilidad, la fuerza hacia arriba igual al peso de agua desplazado por el casco de la barca. Una sustentación adicional, llamada sustentación dinámica, puede producirse por el flujo del agua bajo el casco. El empuje, en el caso de vehículos acuáticos de tracción humana, es la fuerza producida por las acciones del tripulante (aquí se le ve remando) que impulsa la nave hacia delante. La resistencia es la oposición al movimiento hacia delante de la barca; aparece en la mayoría de las naves por la creación de una ola (resistencia de ola) y la fricción entre el casco y el agua que le rodea (resistencia de fricción superficial). Cuando una barca adquiere velocidad constante, la sustentación equilibra al peso y el empuje equilibra a la resistencia. En el proyecto de la barca importa, sobre todo, debilitar la resistencia a la velocidad normal de operación. A las velocidades necesarias para el remo de competición, la resistencia se minimiza construyendo un casco ligero, largo y estrecho.



3. NIVEL DE POTENCIA necesario para que una nave de tracción humana alcance determinada velocidad durante cierto período de tiempo: depende del diseño de la embarcación. El gráfico de la izquierda muestra la potencia requerida para una embarcación de remo, que depende del desplazamiento de agua por el casco para la mayor parte de su sustentación, comparada con otros dos diseños de naves (uno de ellos el creado por los autores), que dependen de la sustentación dinámica producida por hidroperfiles. A bajas velocidades, las naves con cascos de desplazamiento obtienen un rendimiento mayor que las naves con hidroperfiles. Estas últimas presentan una velocidad mínima por debajo de la cual los hidroperfiles no pueden soportar el peso combinado de la nave y su tripulante. A velocidades más altas, sin embargo, las embarcaciones con hidroperfiles rinden más que las naves con cascos de desplazamiento. El gráfico de la derecha muestra cómo la potencia que puede suministrar un campeón atlético disminuye con la duración del esfuerzo. Para cortos intervalos, la potencia generada por el movimiento de pedaleo resulta ser considerablemente más alta que la generada por el movimiento de remo. Un diseño óptimo del hidroperfil posibilita alcanzar velocidades superiores a los 20 nudos. Tal velocidad requiere niveles de potencia que sólo pueden lograrse pedaleando durante unos pocos segundos. Una nave que incorpore tal hidroperfil puede encontrar dificultades para arrancar, ya que su velocidad de "despegue" superaría los 11 nudos.

dadosamente una capa lubrificante de algas naturales, o de algún otro microorganismo inocuo, sobre el casco.

La succión de capa límite es otra técnica que se ha aplicado para estabilizar las capas límites laminares. Con este método, se "chupa" continuamente la capa límite hacia el interior de la barca, a través de poros o pequeñas ranuras en la superficie del casco. La embarcación podría hacer uso de la succión de capa límite si se la dotase de un casco poroso que permitiera se colara el agua hacia el interior. Una pequeña bomba serviría para achicar agua.

La textura de la superficie mojada del casco puede intervenir también en el debilitamiento de la resistencia de fricción. Investigaciones realizadas bajo el patrocinio de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio han demostrado que una superficie pulida y encerada no siempre proporciona una resistencia de fricción superficial mínima. Superficies con estrías muy delgadas y orientadas en la dirección del flujo, denominadas costillitas, han demostrado proporcionar un 6 por ciento menos de resistencia que las superficies lisas.

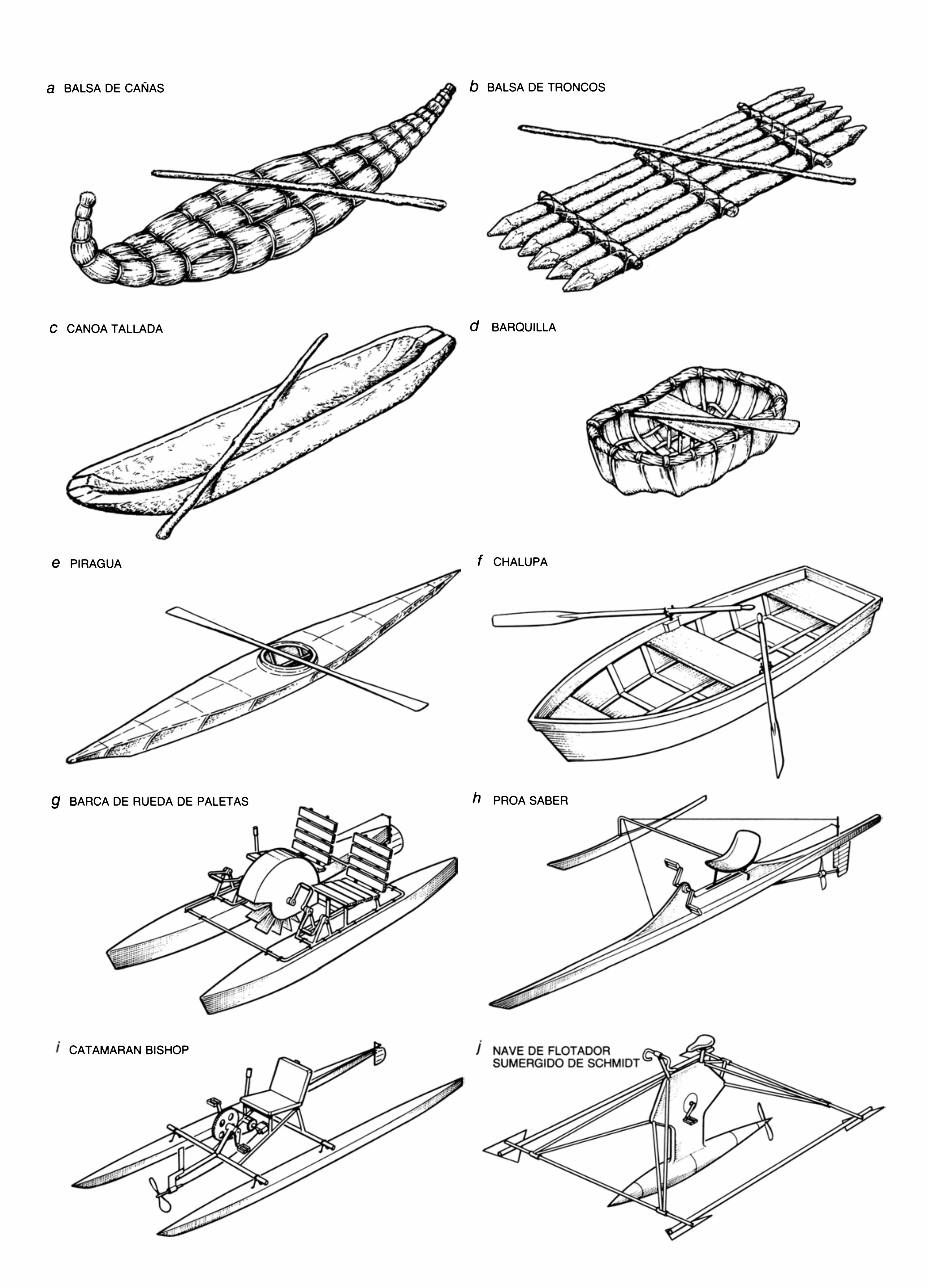
Un grupo del Instituto de Investigaciones de Vuelo, encabezado por Douglas McLean, de la compañía Boeing, ha sometido a experimentación las costillitas en embarcaciones de remo. El grupo cubrió un monoplaza con un revestimiento de plástico, estriado adrede. El espaciado entre estrías era de unos 80 micrometros, más fino que el espaciado entre surcos de un disco fonográfico. Las pruebas indicaron que la velocidad máxima de un casco podía incrementarse en un dos por ciento. Aunque pudiera parecer una cantidad insignificante, equivale a una ventaja de cuatro largos (cuatro veces la longitud de la barca) en una carrera normal de 2000 metros.

Apoyados en tan esperanzadores resultados, el recubrimiento experimental se aplicó al casco del equipo olímpico estadounidense de remo de cuatro con timonel (el timonel no rema, pero marca la cadencia de remo). El equipo hizo una excelente demostración, ganando la medalla de plata en los Juegos de Verano de 1984.

Además de una baja resistencia, otro ingrediente esencial para el éxito de una embarcación de competición es obtener un buen rendimiento propulsivo: en la medida de lo posible, la potencia de los ocupantes debe convertirse en empuje útil. En el caso del remo, dos grandes avances datan de mediados del siglo XIX. Uno fue el desarrollo del aparejo moderno, en 1843. Este aparejo es un dispositivo semejante a un trípode, unido al lateral de la barca. El cerrojo del remo, o punto de pivote, se encuentra en el vértice del trípode. Puesto que el cerrojo del remo no necesitaba ya estar directamente unido a las regalas o bordes de la barca, el casco podía ser más estrecho (reduciendo la resistencia de ola) y los remos podían ser más largos (permitiendo a los remeros dar mayores y más eficientes paladas).

El segundo avance, el asiento deslizante, se produjo en 1856. Hasta entonces, los botes de remo se propulsaban mediante el uso de los brazos, hombros y espalda, de manera que los grandes músculos de las piernas se utilizaban únicamente para reforzar o soportar el cuerpo. El movimiento de remar representaba un pesado esfuerzo contra la resistencia que forzaba a avanzar lentamente. La disposición con banco deslizante permitió utilizar la energía de los músculos de las piernas, al moverse el banco hacia atrás y hacia delante por la flexión y extensión de las piernas durante el ciclo de remo. El primer banco deslizante era un dispositivo bastante tosco que constaba de un cojín de piel de oveja que deslizaba sobre un panel engrasado. El banco móvil sobre cojinetes, todavía en uso, se inventó en los Estados Unidos en 1857.

Peter Michael Kolbe se valió de una embarcación con una variación del asiento deslizante para ganar el Campeonato del Mundo de 1981, en Munich. A diferencia de los cascos convencionales, que disponen de banco deslizante y aparejo y bastidores, o apoyapiés, fijos, la embarcación empleada por Kolbe constaba de un banco fijo y una estructura deslizante que soportaba el aparejo y los bastidores.


a BALSA DE CAÑAS
b BALSA DE TRONCOS
c CANOA TALLADA
d BARQUILLA
e PIRAGUA
f CHALUPA
g BARCA DE RUEDA DE PALETAS
h PROA SABER
i CATAMARAN BISHOP
j NAVE DE FLOTADOR SUMERGIDO DE SCHMIDT

Con esta configuración, la acción de remar es la misma que en los cascos convencionales; ahora bien, como la mayor parte de la masa del remero se encuentra sobre el banco fijo, las oscilaciones del centro de masas (que vienen a coincidir con el remero) disminuyen enormemente. Esto, a su vez, reduce las oscilaciones de velocidad a que está sometida la nave cuando avanza a través del agua. (Estas oscilaciones se manifiestan en una embarcación convencional por su característico movimiento a tirones cuando se rema a marcha forzada.)

Puesto que la resistencia de fricción superficial no es una función lineal de la velocidad del agua con respecto al casco (en realidad es proporcional al cuadrado de la velocidad), una velocidad fluctuante produce siempre más resistencia que la que encontraríamos si la barca se moviera estacionariamente a la velocidad media. La reducción de resistencia obtenida por la configuración deslizante del aparejo es ligera, aunque suficiente para obtener una diferencia importante en el ámbito de la competición. En los Campeonatos del Mundo de 1982, cinco de los botes que participaron en las finales masculinas tenían bancos fijos y aparejos deslizantes. En 1983, los seis finalistas utilizaban barcas con aparejos deslizantes. Sin embargo, después de 1983, las barcas de aparejo deslizante fueron declaradas ilegales para la competición.

Aunque el añadido del aparejo y del banco deslizante aumentan significativamente el rendimiento propulsivo al remar, el remo tiene una limitación fundamental. Remos y paletas son útiles que producen básicamente resistencia: generan empuje al deslizarse hacia atrás a través del agua. El deslizamiento representa una pérdida de rendimiento; puede reducirse esta pérdida incrementando el tamaño de la pala del remo, pero sólo hasta cierto grado, en razón de otras restricciones prácticas. Más aún, la resistencia aerodinámica causada por las palas cuando se hallan fuera del agua, durante el retorno de palada, puede ser notable, en particular cuando sopla el viento.

El rendimiento de un sistema de propulsión está definido por la relación entre la potencia útil resultante, producto del empuje medio por la velocidad, y la potencia humana invertida. No conocemos bien los procesos físicos implicados en la acción de remar, pero el análisis de muchos investigadores ha situado el rendimiento propulsivo al remar entre el 65 y el 75 por ciento. Por consiguiente, la barca aprovecha, como trabajo útil, alrededor de dos tercios de la potencia suministrada por el remero; el resto se pierde en crear perturbaciones en el agua y en el aire.

Las barcas motorizadas abandonaron los dispositivos propulsivos de resistencia, como las ruedas de paletas, hace mucho tiempo, en beneficio de las hélices. Conviene recordar que, antes de la creación de pequeños motores fueraborda de gasolina en el cambio de siglo, se estaban desarrollando barcas de tracción humana impulsadas por hélices, con propósitos prácticos de transporte. Tales barcas impulsadas por hélice demostraron ser mucho más rápidas y menos fatigosas que las canoas o los botes de remos. En la década de 1890, un catamarán (barca con dos quillas) impulsado por hélice y con tres tripulantes se manifestó un 13 por ciento más rápida que un casco con tres remeros, sobre un recorrido de 163 kilómetros por el río Támesis.

Inconveniente de las hélices es su fácil tendencia a enredarse con las hierbas o a golpear contra el fondo en aguas poco profundas; pero en favor suyo hay que destacar su característica idoneidad para aplicaciones de potencia humana [véase “La hélice”, por E. Eugene Larrabee; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1980]. Se pueden aplicar diseños de hélices de palas estilizadas y alto rendimiento, ya que el nivel de potencia es bastante bajo. Además, las velocidades de punta de pala de la hélice, relativamente bajas, permiten que la cavitación no represente un problema. (La cavitación, o formación de burbujas de vapor de agua, aparece cuando la presión absoluta en alguna parte de la hélice en rotación cae por debajo de la presión de vapor del agua; la cavitación, que reduce el rendimiento, puede causar un desgaste excesivo de las superficies de las palas.) Varias naves se han equipado ya con hélices cuyos rendimientos superan el 90 por ciento.

El movimiento rotativo de las hélices hace también relativamente fácil moverlas mediante un dispositivo de pedales, piñones y cadenas, como en las bicicletas. Tal configuración aprovecha las ventajas de los movimientos fuertes y rápidos de las piernas. La acción circular del pedaleo continúa siendo el método práctico más eficaz de transferir potencia continua del hombre a la máquina. (No es ninguna coincidencia que los vehículos de tracción humana que ostentan las mejores marcas aéreas y terrestres dependan de un tren de potencia del tipo de la bicicleta.)

Un campeón ciclista puede producir alrededor de dos caballos de potencia durante unos segundos de esfuerzo máximo. Sin embargo, para períodos de esfuerzo continuo de más de seis minutos, la potencia producida no suele superar medio caballo. Diversos factores influyen en la producción de potencia, incluido el ritmo de pedaleo, la altura del sillín, la longitud de la biela del pedal y la condición física y voluntad del ciclista. El tradicional movimiento de remo, en el que el remero se sienta y pone en juego sólo los músculos de su espalda, hombros y brazos, proporciona bastante menos potencia que el movimiento de pedaleo. La adición del banco deslizante, sin embargo, incrementa el nivel de potencia del remo hasta rivalizar con el del pedaleo, al menos durante intervalos de algunos minutos. (La ventaja en períodos cortos del ciclista se pierde al cabo de un minuto en razón de las limitaciones impuestas por los sistemas respiratorio y circulatorio.)

La ventaja de que gozan las barcas con hélice movida a pedal sobre las barcas de remo yace, por tanto y principalmente, en el menor rendimiento de los remos a la hora de canalizar la energía humana en la propulsión de la embarcación. Además, la velocidad irregular de una barca de remos supone mayor penalización, en cuanto a resistencia se refiere, que la velocidad regular y continua que puede obtenerse con una hélice.

Los ingenieros de naves rápidas de tracción humana han ensayado otros métodos para aliviar la resistencia. Una manera de eliminar virtualmente la resistencia de ola, y al mismo tiempo reducir la resistencia de fricción superficial, consiste en sumergir el casco; el

4. HIDRONAVES DE TRACCION HUMANA y su amplia variedad de formas materiales de construcción y dispositivos propulsores. Las naves relativamente primitivas utilizan pértigas (*a-c*) o paletas (*d-e*) y están hechas de materiales naturales muy diversos: cañas, madera o pellejos animales. Las más modernas se construyen de madera o metal y son de remo (*f*), acción que reclama el uso de los brazos, hombros y espalda; o avanzan mediante paletas con pedales de pie, poniendo en juego los fuertes músculos de las piernas (*g*). Las barcas de hélices movidas a pedales (*h-j*) tienen mayor rendimiento propulsor que las de remo o de ruedas de paletas. Los nuevos diseños y materiales han ganado la batalla de esas naves contra la resistencia. El casco sumergido de Theodore Schmidt en su nave experimental (*j*) elimina, por ejemplo, la resistencia de ola.

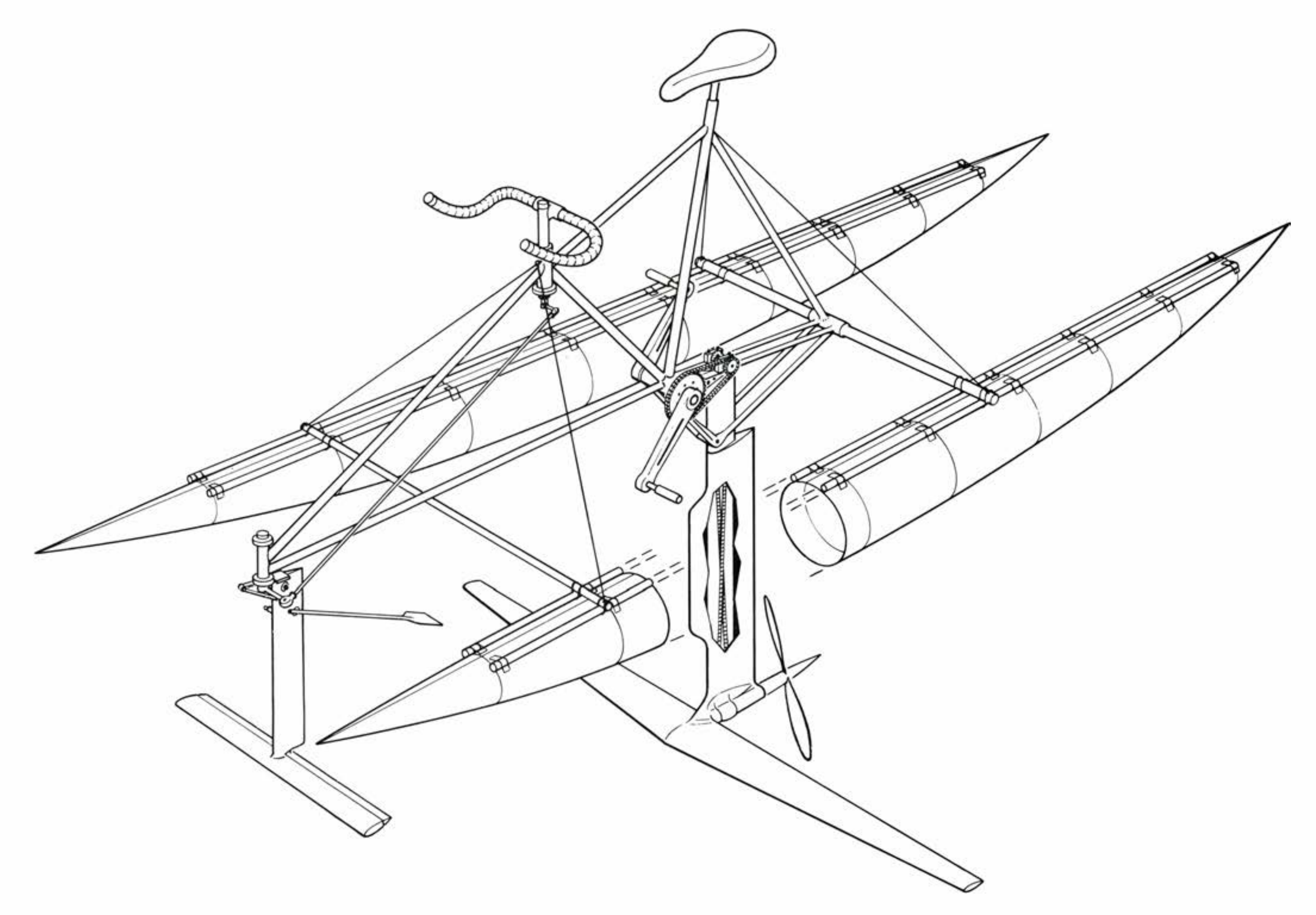
tripulante tendría que mantenerse por encima del agua mediante delgadas columnas que suben desde el casco. El casco de mínima resistencia adquiere, en este caso, forma de lágrima, con una longitud de entre tres y cuatro veces su anchura.

Tal configuración evoca la de un monociclo; mantener el equilibrio resultaría bastante difícil, sino imposible, para el conductor. Theodore Schmidt solventó, en parte, este problema añadiendo cuatro pequeños pescantes hidrodinámicos a una nave experimental de casco sumergido, de su propio diseño. Una configuración semejante a la de un triciclo, con tres cascos de flotabilidad sumergidos menores, resultaría más estable, pero no tan eficiente. Puesto que la relación entre área de la superficie y desplazamiento se acorta al aumentar éste, un gran casco presentará menos área superficial que tres pequeños y la misma flotabilidad total.

El problema del equilibrio de un solo casco sumergido puede resolverse poniendo al tripulante en el casco: creando, de hecho, un submarino. Pero un casco adaptado a las líneas de corriente, y lo bastante grande como para encerrar en su interior a un conductor, desplaza más agua y tiene más área superficial que otro que proporcione la flotabilidad justa necesaria para soportar el peso de una persona. Aunque no sea óptimo para el transporte de tracción humana cerca de la superficie del agua, un submarino de tracción humana podría representar una gran ventaja con respecto a un somorgujo con aletas. A comienzos de los años cincuenta, un submarino biplaza de tracción humana, denominado Mini-Sub, diseñado por Calvin Gongwer, fue fabricado, en cantidad limitada, por la empresa Aerojet-General. Impulsado por dos hélices contrarrotatorias de 760 milímetros, el Mini-Sub alcanzaba velocidades de siete nudos, unas tres veces la velocidad máxima de buceo de un somorgujo.

Otros diseños tratan de reducir la segunda componente de la resistencia, la resistencia de fricción superficial, empleando la sustentación dinámica para elevar parte del bote fuera del agua y, por tanto, reducir la superficie mojada del mismo. Aunque la sustentación dinámica supone, por sí misma, un aumento de la resistencia, en muchos casos la reducción de la resistencia de fricción superficial compensa con creces la resistencia generada como consecuencia de la sustentación dinámica.

Los vehículos de tracción humana que aprovecharían la sustentación dinámica lograda mediante el planeo están todavía en la imaginación de los diseñadores. Pero sí se ha aplicado con éxito otra manera de generar sustentación dinámica: los perfiles hidrodinámicos o hidroperfiles. Los perfiles hidrodinámicos son alas sumergidas que producen sustentación, a imagen de las alas de los aviones. El tamaño requerido por un ala de perfiles hidrodinámicos es bastante modesto, si lo comparamos con las alas de los aviones. Por ejemplo, a una velocidad de nueve nudos se necesita algo menos de una décima de metro cuadrado de perfil para soportar el peso de un solo tri-



5. EL *PEZ VOLADOR II* es una nave con hidroperfiles de tracción humana, diseñada y construida por dos de los autores (Brooks y Abbott). La nave, propulsada por una hélice de alto rendimiento movida a pedal, despega a seis nudos y tiene una velocidad límite de alrededor de 14 nudos. Se gobierna exactamente como una bicicleta. La primera versión carecía de pontones laterales y requería el lanzamiento desde una rampa para catapultarla hasta la velocidad de despegue. Los flotadores de la versión actual aguantan la nave, y así, ahora, puede alcanzar la velocidad de despegue desde una salida en paro. La profundidad a la que "vuela" el hidroperfil se controla automáticamente mediante un seguidor de superficie con forma de espátula, unido a una pequeña aleta en el hidroperfil frontal. La nave ha completado un recorrido de unos 2000 metros en 10 segundos menos que el mejor registro para un casco monoplaza de competición.

pulante sobre el agua. Un hidroperfil diseñado para producir la misma sustentación a una velocidad doble sólo requeriría la cuarta parte de dicha área.

Aunque la breve superficie mojada de las alas de los perfiles hidrodinámicos da lugar a una resistencia de fricción superficial mínima, los hidroperfiles producen otro tipo diferente de resistencia. Cuando el perfil hidrodinámico se mueve a través del agua, deja tras de sí una estela de torbellinos, exactamente igual que las alas de un avión. La energía invertida en generar la estela de torbellinos se manifiesta en forma de resistencia, conocida por resistencia inducida. Además, la espuma levantada por la columna vertical que soporta el hidroperfil, al cortar la superficie del agua, produce una resistencia adicional.

Otro importante problema que plantea una nave de tracción humana con hidroperfiles es el relativo a la necesidad de alcanzar cierta velocidad con respecto al agua, antes de poder "despegar", o elevarse por encima de la misma. Puesto que los perfiles hidrodinámicos producen sustentación cero a velocidad cero, se requerirá otro sistema de soporte, a la manera de un casco de desplazamiento, para las fases inicial y final del vuelo. El ala elegida para permitir altas velocidades tiene que moverse a través del agua a una velocidad de 10 nudos antes de poder generar sustentación suficiente para prestar soporte a la nave y su conductor. Esta velocidad puede resultar inalcanzable mientras la nave se mantenga sobre el agua con un casco de desplazamiento. Un hidroperfil mayor reduce la velocidad de despegue, pero la resistencia causada por el incremento de área de la superficie impide que la nave avance tan rápido.

Acumulando perfiles, de manera que los hidroperfiles menores se sitúen por debajo de los grandes, como se hace en los navíos motorizados y con hidroperfiles, se puede evitar el problema. Una nave con esta configuración de hidroperfiles en "escalera" puede despegar a baja velocidad sobre los grandes perfiles superiores. Obtenida ya una velocidad suficiente para que la sustentación producida por los perfiles inferiores, más pequeños, baste para aguantar la nave, ésta puede levantarse más, saliendo el perfil mayor fuera del agua y aliviando, por tanto, la resistencia. A causa de las dificultades inherentes a los hidroperfiles, una nave de tracción humana dotada de perfiles hidrodinámicos no posee la misma velocidad potencial que los aviones de tracción humana, que han alcanzado velocidades de más de 25 nudos.

Hasta hace poco tiempo, todos los récords de velocidad acuática por tracción humana correspondían a cascos de desplazamiento propulsados a remo. Con intención de superar estas velocidades, dos de los autores (Brooks y Abbott) diseñaron y construyeron, en 1984, el *Pez Volador I*, el primer hidroperfil capaz de un vuelo impulsado únicamente por potencia humana. El engorroso problema de llevar la nave hasta la velocidad de despegue, que había atormentado a los proyectistas hasta entonces, fue solucionado, de entrada, eliminando la necesidad de un casco de desplazamiento. La velocidad de vuelo se obtenía catapultando la nave en el agua desde una rampa flotante, como si se tratara de rampas para reactores de los portaviones. Recurriendo a esa forma de arranque del "vuelo", el ciclista Steve Hegg, un medallista olímpico de oro, pedaleó sobre el *Pez Volador I* un recorrido de 2000 metros en seis minutos y 38 segundos, pulverizando el mejor registro mundial para un solo remero al ganar 11 segundos. Los tiempos, desde luego, no son directamente comparables, puesto que el récord de remo se estableció a salida parada.

El *Pez Volador I* tenía una hélice de alto rendimiento, propulsada a pedales, y dos alas estilizadas afianzadas en estrechas columnas verticales. El ala principal, que soportaba el 90 por ciento del peso de la nave, tenía una gran envergadura (1,8 metros), para minimizar la resistencia inducida, y una pequeña cuerda, o anchura, para reducir la resistencia de fricción superficial. El ala frontal, más pequeña, presentaba una configuración parecida a una T invertida y estaba cargada sólo ligeramente; debía proporcionar estabilidad y control. Con tal fin, portaba un dispositivo en espátula que controlaba automáticamente la profundidad del ala. El dispositivo patinaba sobre la superficie del agua, ajustando continuamente una aleta delgada (análoga al elevador de la cola de un avión) a la que iba unido.

El pescante delantero se doblaba como un timón y estaba conectado a un manillar para gobernar la nave, cuya conducción no difería de la característica en una bicicleta de carreras. La estructura que descansaba sobre el agua era, de hecho, un cuadro de bicicleta modificado.

Con el *Pez Volador II* pretendimos perfeccionar la primera versión de la nave. Se le unieron pontones flotantes de peso ligero, con la esperanza de que despegara a salida parada, sin ninguna asistencia. Así ocurrió; y, con la práctica, la aceleración desde la salida parada hasta el completo funcionamiento como perfil requería solamente tres segundos. La nave se convertía, de esta forma, en un dispositivo mucho más versátil, capaz de "aterrizar" y despegar sobre sus flotadores. (El *Pez Volador I*, catapultado al principio, daba a su conductor un chapuzón cuando éste dejaba de pedalear.)

A bordo del *Pez Volador II*, uno de los autores (Abbott) obtuvo un tiempo de seis minutos y 39,44 segundos sobre un recorrido de 2000 metros con salida parada: cerca de diez segundos menos que el récord para embarcaciones de remo monoplazas. Desde una salida en vuelo, la nave de hidroperfiles realizaba un sprint de 250 metros de 38,46 segundos, alcanzando una velocidad máxima de unos 13 nudos.

Estamos en las puertas de una revolución tecnológica en las embarcaciones, de recreo, de tracción humana. Laser International acaba de introducir el Mallard, un bote marino parcialmente cerrado, diseñado por Garry Hoyt. Nuevos catamaranes de pedal y proas (barcas que disponen de un casco principal y un pescante estabilizador más pequeño) ofrecen valiosas prestaciones marineras para aguas bravas y una respetable velocidad. Jon Knapp, de Saber Craft, ha diseñado y construido una proa impulsada por hélice que es más rápida que un "cascarón" en aguas bravas, y que, a diferencia de éste, no requiere habilidades especiales para tripularla. El "Doryciclo", nave de un solo casco impulsada por hélice y diseñada por Philip Thiel, proporciona buena capacidad de transporte de carga a velocidades dos veces mayores que las de la nave de remo.

Se conviertan o no las naves de hidroperfiles en medios de recreo, parecen existir pocas dudas sobre su presencia inmediata en los libros de récords. La Asociación Internacional de Vehículos de Tracción Humana fomenta las competiciones entre vehículos de tracción humana –por tierra, mar o aire– sin ningún límite arbitrario sobre su diseño. Esta competición elevará el techo de la velocidad de las naves de tracción humana con perfiles hidrodinámicos. No es muy aventurado prever que tales naves alcanzarán los 20 nudos: vez y media las velocidades obtenidas por el *Pez Volador II* y mucho más que las registradas por las embarcaciones de remos propulsadas por ocho atléticos remeros.

Un complejo de apartamentos romanos

En las Casas Jardín de Ostia, del siglo II de la era cristiana, predomina una rigurosa geometría. Desde la planta del conjunto a los mosaicos individuales reina en los diseños un esquema particular, rico en sugerencias filosóficas

Donald J. Watts y Carol Martin Watts

Cerca de la desembocadura del Tíber, bajo la senda de vuelo del aeropuerto Leonardo da Vinci, se encuentran las ruinas de ladrillo, excavadas, del antiguo puerto romano de Ostia. Entre los restos más fascinantes de este rico yacimiento arqueológico están los de una barriada de apartamentos, tiendas y jardines conocidos como Case a Giardino o Casas Jardín; impresionan en parte porque eran un conjunto planificado: se parecían de modo sorprendente a una urbanización moderna. Aun en estado ruinoso, con paredes que apenas alcanzan la altura de un piso, y con hierbajos que ocupan los espacios que debieron ser en tiempos hermosos jardines, trasmiten una palpable sensación de orden y armonía.

Como parte de un estudio más extenso de las casas romanas antiguas, analizamos en detalle las Casas Jardín. Mientras lo hacíamos, encontramos la clave de su diseño: un solo esquema geométrico que se repite a todas las escalas, desde la configuración total de los edificios al planteamiento de los mosaicos del pavimento. Al esquema, que se funda en el cuadrado y en una cierta manera de dividirlo, lo llamamos "sección sagrada". Al asegurar unas relaciones proporcionales entre las partes del complejo y las partes del conjunto, la sección sagrada da unidad y armonía al diseño. Para los antiguos romanos, y en particular para el desconocido arquitecto de las Casas Jardín de Ostia, el esquema pudo haber tenido también un significado filosófico más profundo.

Durante su apogeo en los siglos I y II d.C., Ostia era una ciudad densamente poblada, con sus malecones animados por el tráfico de las galeras, sus almacenes repletos de trigo, aceite y vino con destino a la capital imperial. El lodo, sumado a la decadencia del Imperio Romano, acabó con Ostia. El delta del Tíber se fue haciendo innavegable; la costa avanzó hacia el oeste, dejando atrás a la ciudad. Allá por el siglo IX había quedado abandonada; durante el milenio siguiente las inundaciones sepultaron en barro sus ruinas.

El lento colmatamiento del Tíber creó en Ostia lo que la catastrófica erupción del Vesubio hizo en Pompeya y Herculano en el año 79 d.C.: un tesoro de información sobre la arquitectura doméstica de la Roma antigua. (Las continuas reconstrucciones han destruido la mayor parte de lo que pudiera subsistir en la ciudad imperial misma.) Los diversos yacimientos se complementan entre sí. En Pompeya y Herculano quedan muchos ejemplos bien conservados de la casa tradicional unifamiliar, la *domus*, con su característico dispositivo de las habitaciones alrededor de un atrio central. En la Ostia densamente poblada, por el contrario, como en la misma Roma, sólo los muy ricos podían permitirse una *domus*; las clases media y baja vivían en bloques de apartamentos de tres a seis plantas llamadas *insulae*. Las excavaciones de Ostia, realizadas a principios de este siglo, han descubierto muchas *insulae*, de las que las Casas Jardín son los ejemplos más impresionantes.

Aunque no se sabe quién proyectó las Casas Jardín, sí se sabe cuándo fueron construidas: hacia 128 d.C., durante el reinado del emperador Adriano. La construcción de un nuevo puerto artificial cerca de Ostia por Trajano, predecesor de Adriano, había aumentado la importancia comercial de la ciudad como puerta de entrada de las mercancías importadas por Roma. Para alojar a los inmigrantes que afluyeron a Ostia (su población aumentó hasta unos 50.000), más de media ciudad fue reedificada; las *domus* fueron reemplazadas por enormes *insulae* de hormigón, abovedado y revestido de ladrillo. Trajano y Adriano fueron los promotores de gran parte de la fiebre constructora, pero las Casas Jardín, el proyecto individual de mayor envergadura, fueron probablemente una inversión privada. Parecen destinadas a comerciantes acomodados; estaban convenientemente situadas cerca del mar y lejos de los ajetreados malecones, y los apartamentos, mayores de lo normal, estaban bien decorados, con un lujo especial en algunas de las piezas.

El complejo de las Casas Jardín consistía en un marco continuo de edificación, cuya forma irregular venía impuesta probablemente por calles preexistentes, que rodeaba un patio rectangular de aproximadamente 100 metros de largo por 80 de ancho [*veáse la figura 3*]. Dentro del patio había dos edificios aislados y ostensibles. Cada uno se componía de apartamentos tipificados, con cuatro apartamentos en la planta baja. Cada apartamento tenía en el centro una estancia que era el elemento principal de distribución y que ocupaba el lugar de un atrio y tal vez se llamase *medianum*. A los extremos

1. LAS CASAS JARDIN fueron excavadas en el primer tercio de siglo junto con el resto de Ostia. El complejo de apartamentos, construido hacia el 128 d.C., consistía en un marco continuo de edificios que rodeaban un patio rectangular con otros dos edificios dentro. La fotografía se tomó desde el eje principal este-oeste. La puerta principal (este) se halla en la parte inferior. La "Casa de las Musas", en el noroeste, está restaurada.

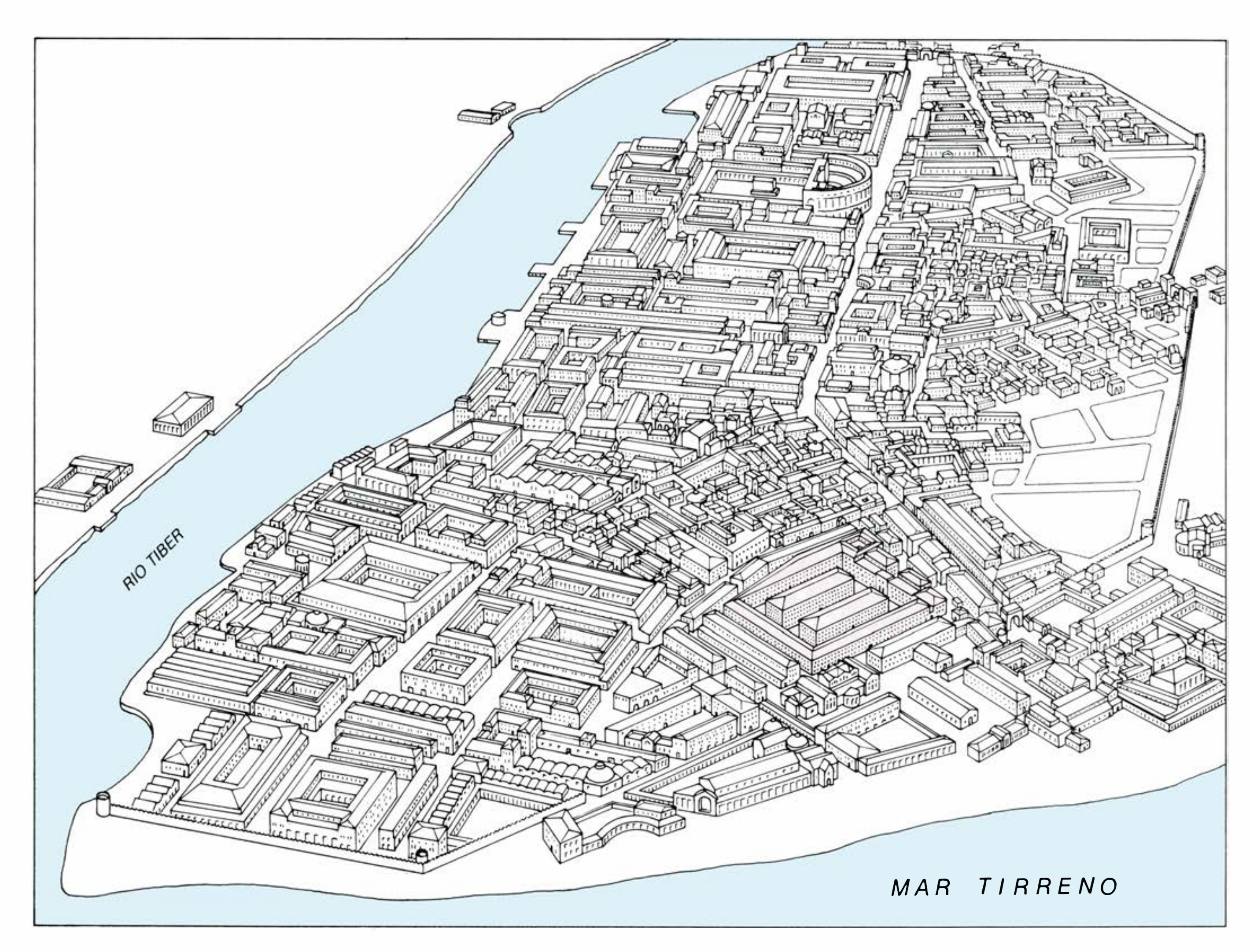


de esta habitación larga y llena de luz, que daba a la pared exterior, había otras dos habitaciones grandes. Varias habitaciones pequeñas, sin ventanas, se emparejaban con el *medianum*, del que recibían luz y aire.

Los edificios del marco contenían por lo menos otros nueve apartamentos en la planta baja, así como unas 40 tiendas. Todos los pisos de la planta baja de los edificios del patio, y la mayoría de los del perímetro, tenían una escalera interior que llevaba a un entresuelo. Otras escaleras independientes, que daban directamente al patio o a la calle, conducían a los apartamentos de los pisos altos. Es poco lo que de estos pisos altos se sabe; sólo se han conservado las plantas bajas de las Casas Jardín. El espesor de las paredes indica que los edificios tenían probablemente una altura de cuatro pisos, incluidos los entresuelos. Según fuese el tamaño de los apartamentos de los pisos altos, y según estos tuvieran o no entresuelos, el complejo pudo haber alojado entre 40 y 100 apartamentos. Probablemente dio albergue a un número de personas entre 400 y 700, incluidos los tenderos que vivían en sus tiendas.

El complejo está orientado aproximadamente a los cuatro puntos cardinales; su fachada y su portal principal miran al este. Dada la forma irregular del marco, el patio grande rectangular es el que impone el orden geométrico al complejo. Su eje mayor sigue el corredor que hay entre los dos edificios del patio y enlaza el portal grande oriental con el portal más pequeño del lado oeste. El eje menor norte-sur está definido por los pasadizos cubiertos que dividen en dos los edificios del patio; su menor importancia está indicada por el hecho de que los portales norte y sur están desplazados del eje. Los dos ejes se cruzan en el centro del complejo. Es probable que el centro estuviera realzado además en la planta topográfica —un foco en el centro es el distintivo de un proyecto romano—, pero no tenemos seguridad; todo lo que queda de los jardines originales son las seis fuentes próximas a los bordes este y oeste del patio, de las que los residentes extraían el agua.

Tanto las fuentes como los edificios del patio se revelan como elementos claves en la ordenación geométrica de las Casas Jardín. Conforme medíamos y examinábamos todas las partes del complejo, nos percatamos cada vez más de la presencia de la mano del arquitecto, de la intencionalidad del tamaño y colocación de los edificios del patio. En nuestro intento de explicar este sentido del orden, consideramos y rechazamos docenas de esquemas geométricos en los que el arquitecto pudiera haber basado su concepción. Al



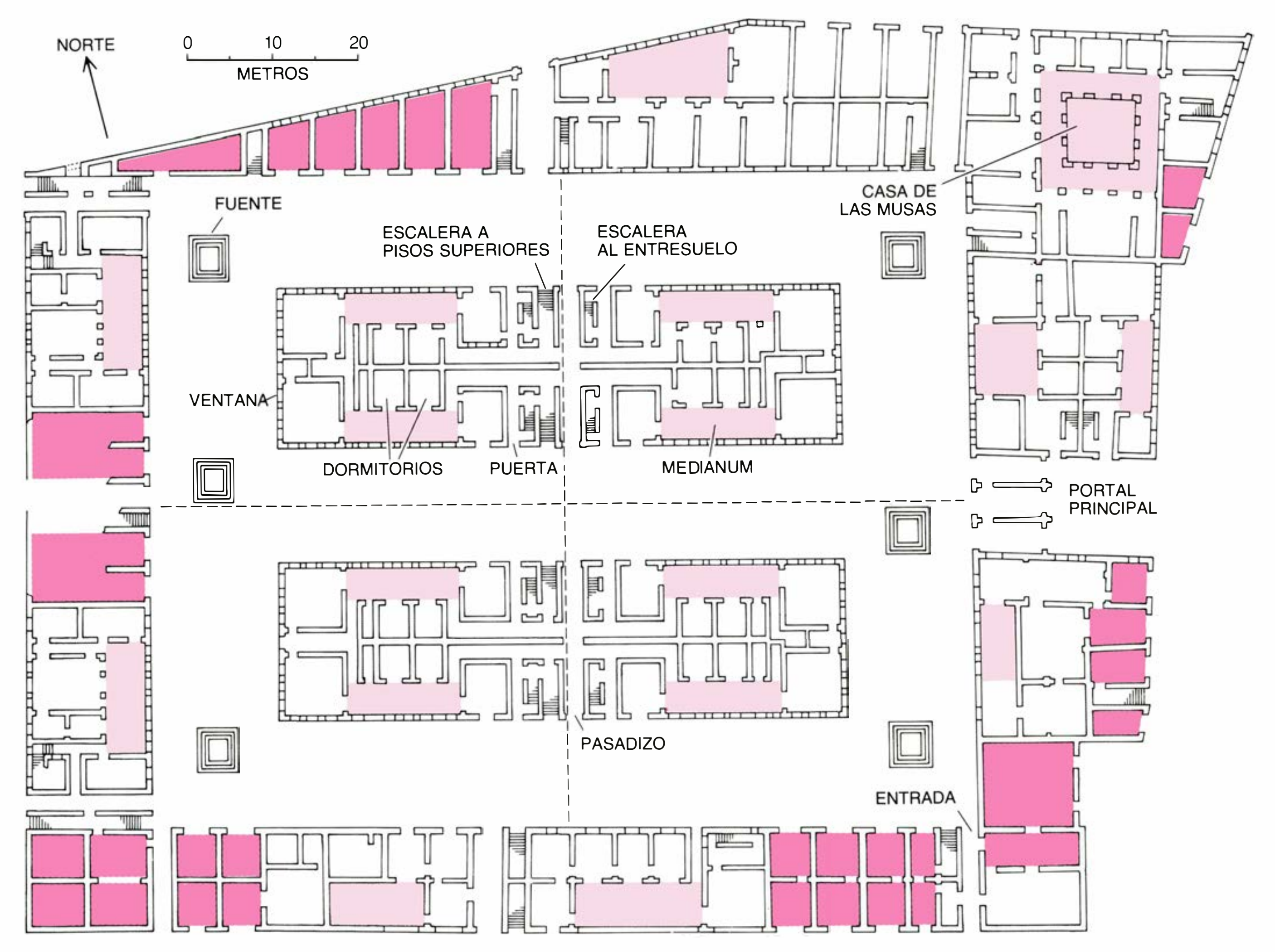
2. OSTIA era una ciudad de milagro económico en el siglo II d.C. La construcción de un nuevo puerto artificial (no visible en el dibujo) en el mar Tirreno había hecho crecer la importancia de Ostia como primer puerto de Roma; mercancías importadas de todo el contorno del Mediterráneo eran embarcadas en su muelle con destino a Roma, situada a unos 25 kilómetros de distancia, remontando el Tíber. Cuando la población de Ostia creció hasta llegar a las 50.000 almas, se levantaron muchas casas de apartamentos, incluidas las Casas Jardín (*en color*). El dibujo, de Tom Prentiss, se apoya en una maqueta basada en las ruinas.

fin, caímos en la cuenta de la sección sagrada.

La sección sagrada es una sencilla operación geométrica [*véase la figura 4*]. Puede hacerse con un cartabón y un compás, instrumentos ambos de los que sabemos, por los escritos del arquitecto Vitrubio, que fueron empleados por los constructores romanos para la confección de sus planos. Se empieza por dibujar un cuadrado (el cuadrado de referencia) y sus diagonales. Después se trazan cuartos de círculo con sus centros en los ángulos del cuadrado, cada uno con un radio igual a la mitad de la diagonal. Los arcos pasan por el centro del cuadrado e intersecan dos lados contiguos; juntos dividen los lados en tres segmentos, el segmento central mayor que los otros dos. Uniendo los puntos de intersección, se puede dividir el cuadrado de referencia en una cuadrícula de nueve partes. En el centro de la cuadrícula hay otro cuadrado (el cuadrado de la sección sagrada) que puede servir de base para la siguiente sección cuadrada.

La expresión "sección sagrada" no es antigua; fue acuñada hace cosa de veinte años por el estudioso danés Tons Brunés. Resulta que la longitud de un arco de la sección sagrada es igual, con una aproximación de un 0,6 por ciento, a la longitud de la diagonal del rectángulo que es la mitad del cuadrado de referencia. Según Brunés, esta casi igualdad de un arco y de una línea recta pudo haber convencido a los constructores antiguos de que habían encontrado un modo empírico de cuadrar el círculo, es decir, de construir un cuadrado con el mismo perímetro que un círculo dado, o viceversa. (Un círculo no se puede cuadrar con exactitud porque el perímetro de un cuadrado es un número racional, mientras que la circunferencia de un círculo es proporcional al número irracional π.) Para los geómetras antiguos el círculo simbolizaba la parte incognoscible, espiritual, del universo, mientras que el cuadrado representaba el mundo comprensible. La cuadratura del círculo era un medio de expresar lo incognoscible por medio de lo cognoscible, lo sagrado por medio de lo familiar. De ahí el término sección sagrada.

Aunque Vitrubio no trata expresamente de la sección sagrada, sí alude a la importancia de los motivos geométricos como medio de alcanzar lo que él considera la cualidad más importante de una buena composición: las relaciones proporcionales entre sus varios elementos. Brunés ha rastreado las aplicaciones de la sección sagrada desde los antiguos egipcios, y a través de los griegos y romanos, hasta la Europa medieval. (El cree que la idea fue trasmitida desde Egipto a Grecia en el siglo VI a.C. por el filósofo Pitágoras.) Es cu-



3. PLANOS DE LA PLANTA BAJA del complejo formado por las Casas Jardín, donde se nos muestra su geometría fundamental. El eje principal este-oeste y el eje menor norte-sur se cruzan en el centro del complejo. Cada apartamento de la planta baja (había 17 en total) constaba de varias habitaciones en torno a una estancia central, posiblemente llamada *medianum (color claro)*. En el complejo había también tiendas (*color intenso*). La entrada a los jardines del patio central caía a los lados y a las esquinas del complejo. El espesor de las paredes indica que los edificios tenían probablemente una altura de cuatro pisos.

riosísimo que haya encontrado la sección sagrada en la composición del Pantheon de Roma, construido aproximadamente por las mismas fechas que las Casas Jardín de Ostia.

Las secciones sagradas están presentes en las composición de las Casas Jardín, empezando por el planteamiento general del complejo. Una secuencia de tres secciones de tres cuadrados de referencia definen tanto el tamaño como la posición de los edificios del patio y por tanto también de los espacios abiertos del patio mismo [*véase la figura 5*]. En la secuencia las secciones realzan el centro y los ejes del complejo de apartamentos, dándoles una unidad formal.

El mayor de los cuadrados de referencia sigue el perímetro del complejo. Lo hace sólo aproximadamente, porque la forma del perímetro es irregular. Sin embargo, el hecho de que el círculo dibujado dentro del cuadrado y tangente a sus lados toque aproximadamente las esquinas del patio revela que el cuadrado no ha sido elegido arbitrariamente. El centro del círculo y a la vez del cuadrado señala el centro del complejo. Las secciones sagradas de los lados este y oeste del cuadrado fijan líneas maestras que coinciden con las paredes externas septentrional y meridional de los dos edificios del patio. Estas paredes confirman el predominio del eje este-oeste impuesto por la forma del patio.

Avanzando hacia el centro, el siguiente cuadrado de referencia está fundado en la anchura del patio. Dado que el patio es rectangular, los lados este y oeste del cuadrado no siguen los bordes del patio; antes bien, coinciden exactamente con los bordes interiores de las seis fuentes. Las secciones sagradas de este cuadrado definen los siguientes planos de la edificación: los espinazos de los edificios del patio, a lo largo de los cuales anchas paredes medianeras separaban los apartamentos por su vertiente posterior.

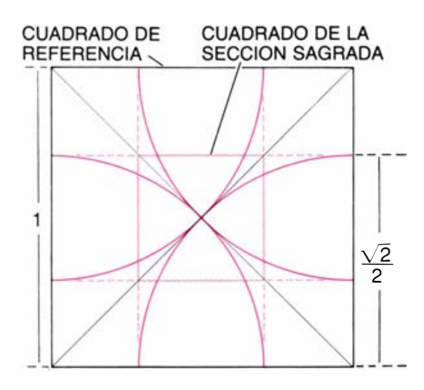
El cuadrado de sección sagrada situado en el centro del segundo cuadrado de referencia sirve de tercero y último cuadrado de referencia. Sus secciones sagradas señalan a su vez la posición de las paredes más interiores de los edificios del patio, o sea, las paredes más próximas al centro del complejo, que limitan el corredor central este-oeste. Cuando los tres cuadrados de referencia se superponen, se alojan concéntricamente uno dentro de otro, y sus secciones sagradas semejan desplegarse como si fueran las capas de una cebolla.

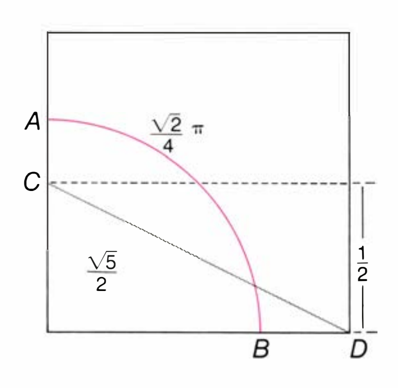
La geometría de la sección sagrada no sólo unifica el complejo como un todo, sino que también da forma a la composición de los edificios individuales. Por ejemplo, la diagonal del más pequeño de los cuadrados de sección sagrada de la serie antes trazada es igual a la anchura exterior de los edificios del patio. Cada edificio, además, tiene una longitud de cinco de estos cuadrados. El cuadrado central de la fila de cinco comprende las escaleras y los vestíbulos de entrada del edificio, mientras que los cuadrados a ambos lados delimitan los espacios de las viviendas.

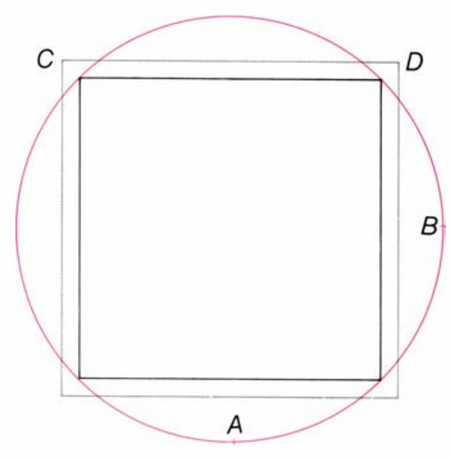
La geometría se extiende, además, a los apartamentos individuales de los edificios del patio [*véase la figura 6*]. Aquí la sección sagrada se utiliza, no para situar los elementos de la composición, sino como fuente de una serie de relaciones proporcionales de números enteros que regula el plano de los apartamentos. El cuadrado de referencia en este caso tiene una diagonal de 58 pies romanos, que es la anchura interior de los edificios del patio. (El pie romano mide 0,295 metros.) El cuadrado mide de lado 41 pies romanos. Dos secciones sagradas sucesivas proporcinan segmentos de 17, 12, siete y cinco pies romanos.

Estas dimensiones o múltiplos de ellas alcanzan mucho realce en el plano del apartamento. La anchura interior de un apartamento es de 28 pies, o cuatro veces siete pies. La anchura del *medianum* y de los dormitorios es la mitad de eso, o sea 14 pies. Las ventanas de la habitación mayor tienen cinco pies de ancho; el espacio entre ellas es de dos pies, con lo que la anchura de una unidad de ventana es de siete pies. Los vestíbulos del interior de los apartamentos miden cinco pies de través. El ancho del espacio público compuesto por el pasadizo cubierto y la escalera de subida a los pisos altos es de 17 pies.

Estas dimensiones debieron tener para el arquitecto de las Casas Jardín un significado más que meramente práctico. Son precisamente los números generados por el procedimiento pitagórico de aproximación a la irracional raíz cuadrada de 2. El procedimiento comienza por un cuadrado de una unidad por lado. La diagonal del

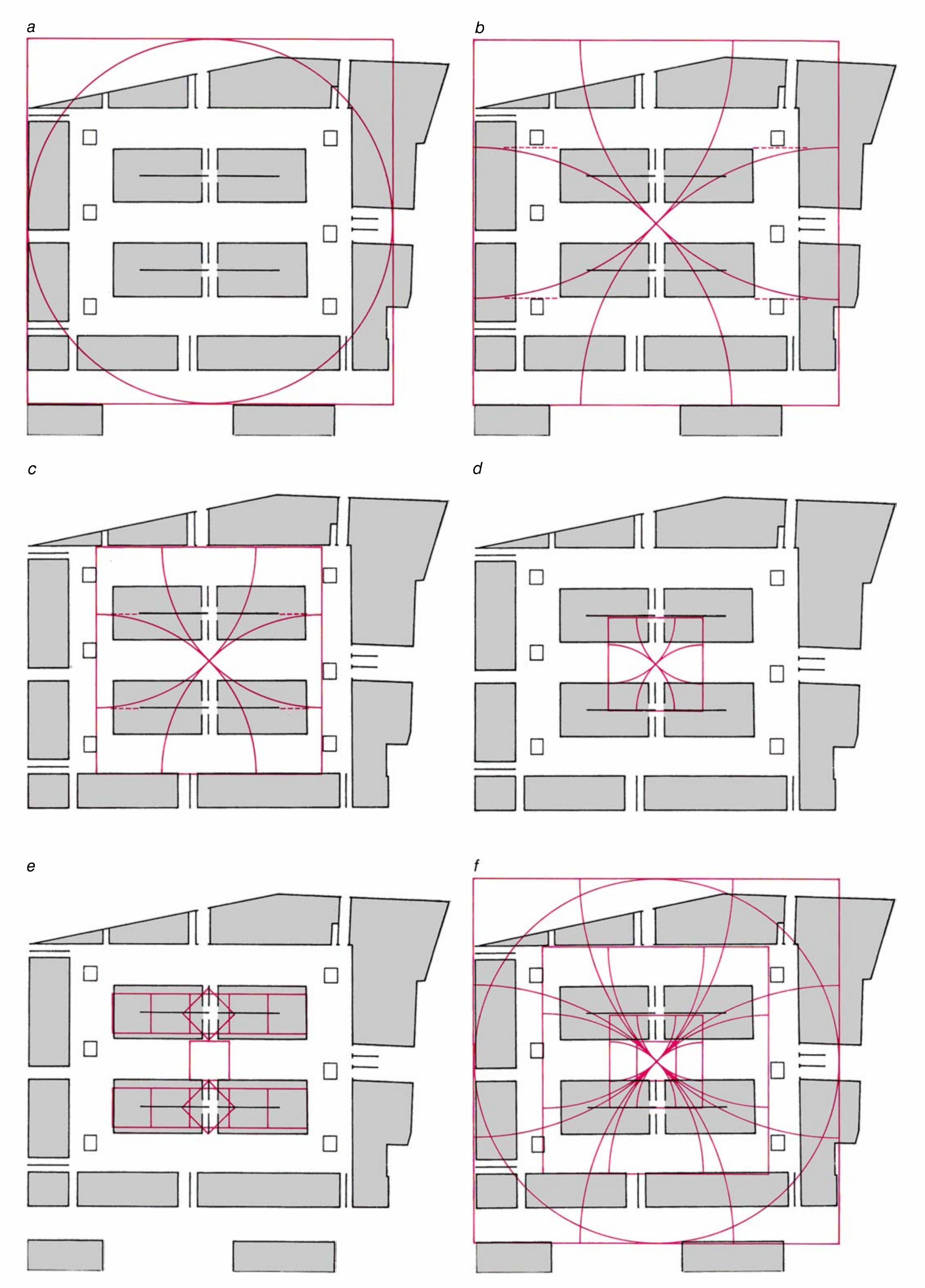


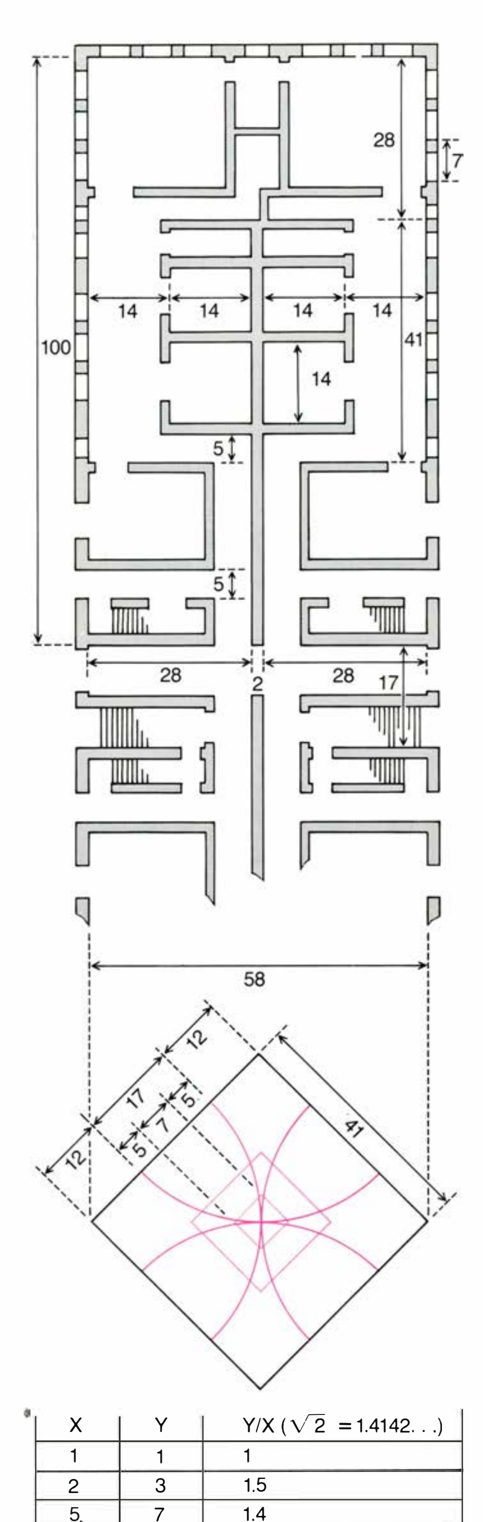




4. "SECCIONES SAGRADAS" de un cuadrado de referencia. Se dibujan trazando arcos que están centrados en los vértices y pasan por el centro del cuadrado. Uniendo los puntos en que los arcos cortan los lados, se obtiene una cuadrícula de nueve casillas. Al cuadrado central se le denomina cuadrado de la sección sagrada. La longitud de cada arco *AB* es igual, con una aproximación del 0,6 por ciento, a la longitud de la diagonal *CD* de la mitad del cuadrado de referencia(*centro*). De ahí que la sección sagrada proporcione un método aproximado de cuadrar un círculo: el perímetro de un cuadrado compuesto de cuatro líneas *CD* es casi igual al de un círculo formado por cuatro arcos de la sección sagrada (*abajo*).

5. ORDEN GEOMETRICO de las Casas Jardín de Ostia, considerado en su conjunto; está determinado por una sucesión de tres secciones sagradas. Un cuadrado que viene a coincidir aproximadamente con el perímetro del complejo inscribe un círculo que toca las esquinas del patio (*a*). Las secciones sagradas de los lados este y oeste de este cuadrado de referencia señalan el emplazamiento de las paredes externas de los edificios del patio (*b*). El segundo cuadrado de referencia, concéntrico con el primero, está definido por la anchura del patio y por las posiciones de las fuentes; las secciones sagradas de sus lados este y oeste señalan la posición de las medianeras sobre los espinazos de los edificios del patio (*c*). El tercer cuadrado de referencia es el cuadrado de la sección sagrada del segundo, y sus secciones sitúan las paredes más interiores de los edificios del patio (*d*). Estos edificios quintuplican la longitud del cuadrado de la última sección sagrada, y su ancho iguala a la diagonal de éste (*e*). La superposición de todas las secciones sagradas muestra de qué modo se despliegan a partir de un centro común, realzando de este modo el eje principal este-oeste del complejo (*f*).


a
b
c
d
e
f



X	Y	Y/X ($\sqrt{2}$ = 1.4142. . .)
1	1	1
2	3	1.5
5	7	1.4
12	17	1.4166. . .
29	41	1.4137. . .

6. PLANOS DE LOS APARTAMENTOS de los edificios del patio de las Casas Jardín; están regulados por las secciones sagradas de un cuadrado cuyos lados miden 41 pies romanos de largo y cuya diagonal es igual a la anchura interna de los edificios (58 pies). La figura muestra dos apartamentos contrapuestos, separados por una medianera de dos pies. Las dimensiones impuestas por las sucesivas secciones sagradas del cuadrado aparecen por todas partes en los apartamentos; el número 7 y sus múltiplos son especialmente frecuentes. La serie de números generada por las secciones sagradas es la misma que la empleada por los geómetras antiguos para converger o aproximarse a la irracional raíz cuadrada de 2.

cuadrado, que según el teorema de Pitágoras es igual a la raíz cuadrada de 2, recibe el valor aproximado de 1. A continuación, la diagonal se suma al lado del cuadrado para generar el lado de un cuadrado mayor; la diagonal del segundo cuadrado es aproximadamente igual a la diagonal del primer cuadrado sumada al doble del lado del primer cuadrado. Construyendo una serie de cuadrados de este modo, y dividiendo la diagonal aproximada de cada cuadrado por su lado, se obtiene la serie de razones 1/1, 3/2, 7/5, 17/12, 41/29 y así sucesivamente. La serie converge hacia la raíz cuadrada de 2.

La misma serie de razones puede ser generada por cuadrados y secciones sagradas, porque la razón del lado de un cuadrado al radio de su arco de sección sagrada es también igual a la raíz cuadrada de 2. (En este caso, el lado de cada cuadrado de la serie se construye sumando el lado del cuadrado anterior al doble de su sección sagrada.) El quinto cuadrado de la serie tiene un lado de 41 y una sección sagrada de 29, como sucede en el cuadrado que subyace al plano del apartamento de las Casas Jardín.

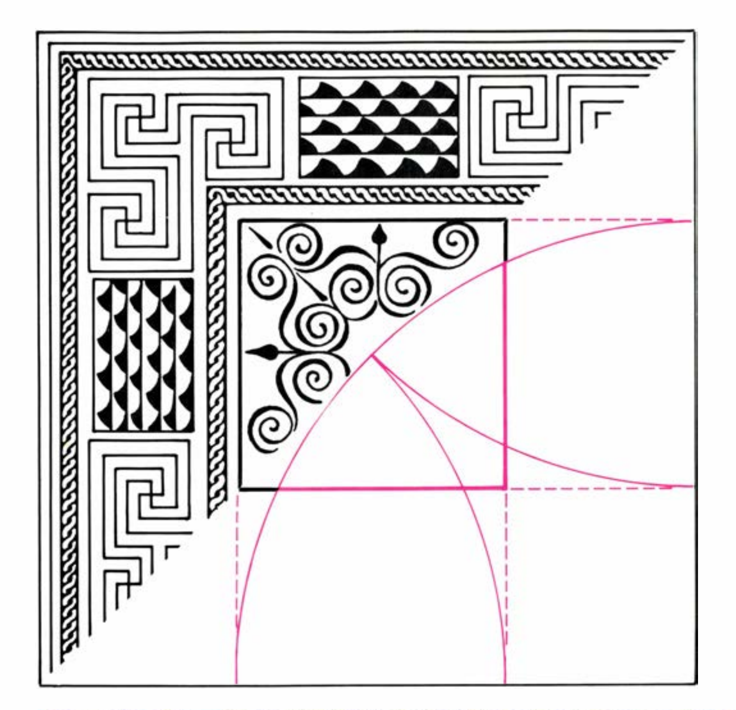
Al basar su plano en una serie de números que se aproximan a la irracional raíz cuadrada de 2, el arquitecto de las Casas Jardín estaba haciendo una declaración filosófica similar a la cuadratura del círculo (que es equivalente a una aproximación a π). En ambos casos, la sección sagrada es el medio de expresar lo irracional e indefinible por lo racional y definible.

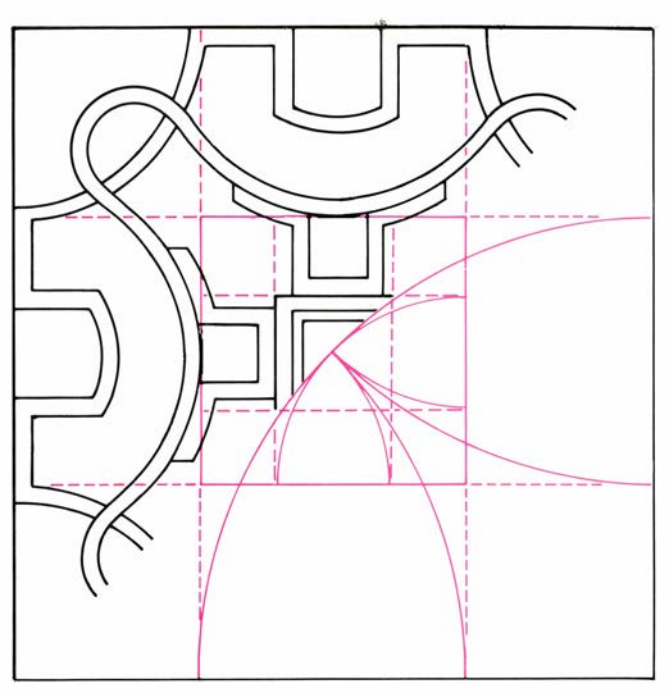
A escala mínima, en las Casas Jardín la sección sagrada sirve de base al diseño de las decoraciones de pavimentos, paredes y techos individuales. Ninguna de las decoraciones de los edificios del patio se conserva bien, pero en los del perímetro han sobrevivido algunas. En un edificio llamado Casa de las Musas, en la esquina noroeste del complejo, un pavimento cuadrado de mosaico cubre la mayor parte de una habitación. En el centro del mosaico hay un medallón cuadrado; su tamaño viene dictado por la sección sagrada del borde externo. Composiciones semejantes se encuentran en otras partes de las Casas Jardín. En algunos casos los mosaicos de las habitaciones de un mismo apartamento parecen relacionarse en tamaño y geometría. Por ejemplo, el mosaico de una habitación puede tener el tamaño del cuadrado de sección sagrada del mosaico de otra habitación mayor.

Además de tener mosaicos de pavimento, es probable que la mayoría de las habitaciones de las Casas Jardín estuviesen decoradas con pinturas de brillantes colores en techos y paredes. Ninguno de los techos está intacto, pero hay fragmentos suficientes de uno de ellos para hacer posible reconstruir su composición. Como los mosaicos de pavimento, es cuadrado y de planta centrada. Las secciones sagradas del cuadrado exterior determinan las posiciones de dos juegos de arcos; el cuadrado de sección sagrada del borde exterior se corta después, otra vez, para delimitar un medallón central.

Las pinturas de los muros del interior también dan pruebas de la presencia de la sección sagrada. Cierto que muchas de las paredes no son cuadradas, sino o bien más anchas que altas o más altas que anchas. Sin embargo, en casi todos los murales conservados la composición parece estar basada en un teórico cuadrado de referencia cuyos lados tienen el ancho de la pared. La geometría de la sección sagrada no sólo determina la colocación de los elementos principales de la composición, sino que también, como en los planos de los apartamentos, proporciona una serie de números que dictan las dimensiones fundamentales de la pintura.

La sección sagrada es sólo uno de tantos esquemas geométricos, en su mayoría fuertemente centralizados y axiales, que se encuentran en la composición romana; y sin embargo, su insistente repetición en las Casas Jardín de Ostia revela que tenía una especie de importancia ritual. Ahora andamos buscando la sección sagrada en otras parcelas de la arquitectura romana. Nuestras mediciones han revelado ya su presencia en el plano y decoración de muchas casas unifamiliares de Pompeya y Herculano, que fueron construidas entre uno y tres siglos antes que las Casas Jardín; al parecer, la sección sagrada era un rasgo de la *domus* que se conservó cuando los arquitectos romanos comenzaron a proyectar casas de elevada densidad. Y, naturalmente, la aplicación del esquema sobrepasó la proyectiva doméstica. Como más arriba hemos indicado, Brunés la ha localizado en edificios públicos tales como el Pantheon. Pudo haberse empleado incluso en la planificación urbanística: nosotros hemos descubierto indicios fehacientes de que toda una ciudad romana construida en el Cercano Oriente en el siglo I d.C. fue trazada utilizando una geometría derivada de la sección sagrada.





7. MOSAICOS Y PINTURAS de las Casas Jardín. Están ejecutados en muchos casos de acuerdo con la geometría de la sección sagrada. La fotografía muestra el mosaico de un suelo de la Casa de las Musas. El medallón central del mosaico es el cuadrado de la sección sagrada del borde exterior (*arriba a la izquierda*). En el esquema de la pintura de un techo (*arriba a la derecha*), las secciones sagradas del borde exterior determinan el radio de los arcos de los vértices, mientras que los arcos grandes de cada lado son tangentes al cuadrado de la sección sagrada. Las secciones de ese cuadrado enmarcan el medallón central.

Juegos de ordenador

Montañas fractales, plantas graftales y múltiples ordinográficos en Pixar

A. K. Dewdney

Puedo imaginar sin esfuerzo el primer largometraje cinematográfico enteramente generado por ordenador. Estamos en 1991. Bajo a trompicones por el pasillo de la sala cargando una bolsa tamaño híper de palomitas sintéticas y una bebida sin alcohol elaborada con unos cuantos aditivos que hacen innecesarios los ingredientes habituales. Las luces de la sala se amortiguan hasta apagarse, se levanta el telón y la pantalla cobra vida con una adaptación de *El señor de los anillos,* de J. R. R. Tolkien. El hobbit Frodo pasea por un estrecho valle. En la lejanía, los agudos picachos de la sierra, festoneados de nieve, se hincan en el cielo. Plantas exóticas y árboles de especies desconocidas rielan en primer plano, heridos por el sol. La escena se muda en un mago que observa fijamente su bola de cristal. En el centro de la esfera cristalina se distingue una fortaleza, por entre cuyas almenas saltan y cabriolean las llamas.

Es difícil aventurar hasta qué punto resultarán convincentes los andares de Frodo, o su modo de hablar, pero no me cabe la menor duda de que las montañas, las plantas, la bola de cristal y las llamas van a quedar formidablemente. El éxito de la empresa se deberá en gran medida a la iniciativa que casi en solitario está llevando a cabo, tanto en el campo de la programación como en el del soporte físico, una compañía llamada Pixar, antes Lucasfilm Computer Graphics Laboratory. Después de visitar ese fascinante centro de ordinográficos de San Rafael, California, me encuentro en disposición de compartir con los lectores los más íntimos secretos de árboles y montañas. Basta disponer de un ordenador doméstico para generar imágenes que recuerden muy de cerca tales objetos. Los límites de espacio de esta sección obligan a descartar un tratamiento amplio del fuego y las bolas de cristal; empero, dejaré al desnudo los principios básicos que permiten generarlos.

En el hipotético filme que he descrito, la cámara podría hacer zoom sobre los picachos nevados situados detrás de Frodo. Jamás se habrá visto tierra tan imponente e impenetrable. Cada uno de los grandes picachos está formado por picos más pequeños, compuestos a su vez por otros menores, y así indefinidamente: una regresión infinita de picachitos. Hasta un Orc —bestia similar a una gárgola, de patas coriáceas— se encontraría incómodo sobre pendientes tan ásperas.

En principio resulta fácil generar esas cordilleras. Para mayor simplicidad supondré que el terreno cubre una zona triangular. Se subdivide el triángulo en cuatro triángulos más pequeños, hallando el punto medio de cada lado y uniéndolos por segmentos rectilíneos. Seguidamente se subdivide de igual modo cada triángulo. Persiste el proceso hasta que se alcanzan los límites de resolución, o el tiempo de computación establecido. El resultado —una malla triangular muy poco interesante— puede hacerse un poco menos regular aportando algo de variación en sentido vertical: cada vez que se añade a la escena un punto medio, se desplaza arriba o abajo en una magnitud aleatoriamente determinada. Tales desplazamientos aleatorios, que por norma han de decrecer al irse reduciendo los triángulos, transforman éstos en una superficie rugosa, compuesta por múltiples picos y valles [*véase la figura 2*].

¿Por qué crea esa técnica una cadena de montañas de aspecto natural? La respuesta reside, en parte, en que tal proceso genera una fractal: un tipo de objeto que revela más y más detalle conforme va ampliándose. Al parecer, la naturaleza se encuentra atestada de fractales. Benoit P. Mandelbrot, infatigable fractalista del Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM, recurre a las líneas de la costa para ilustrar la idea fundamental. Imaginemos que se nos pidiera medir la longitud de la costa española con una enorme regla de un kilómetro de largo. En imponente caminata pasearíamos la vara a lo largo del litoral y contaríamos el número de veces que hemos colocado la regla origen con extremo. Sin embargo, al hacerlo así saltaremos muchas calas y puntas de tierra, por lo cual la medición no resultará estrictamente exacta. Al repetir el ejercicio con una regla de un metro se obtendrá una medición más precisa; también sería mayor la longitud medida. Pero incluso en ese caso habremos saltado gran número de diminutas bahías y minúsculas lenguas de tierra. Sin duda la medición sería más precisa con una vara de un centímetro.

Por norma, la medida del perímetro de costa aumentará conforme se reduzca la longitud de la regla utilizada. La relación existente entre la longitud medida y la de la vara con que se mide es un número especial, que se denomina dimensión fractal. Se diferencia de la dimensión ordinaria en que suele expresarse por un número fraccionario, y no por un entero. La costa en cuestión podría tener, por ejemplo, una dimensión fractal de 3/2. Cabe considerar que esa forma es intermedia entre las de dimensión 1 (una línea recta) y las de dimensión 2 (el plano). Si el litoral es relativamente rectilíneo, su dimensión fractal será próxima a 1; si el perfil de la costa fuera muy accidentado, su dimensión fractal tendería a 2, al ir el perfil llenando más y más un plano bidimensional.

El modelo fractal de la naturaleza comporta una regresión infinita en el detalle. Desde el punto de vista de los gráficos computarizados, la idea de regresión infinita puede inducir a confusión; bastará con que el paisaje ofrezca suficiente detalle a cualquier ampliación. Hasta que se alcanzan los límites de resolución de la pantalla, las montañas a generar tienen detalles tan finos como los triángulos finales utilizados en la subdivisión anteriormente descrita. Aunque el algoritmo completo de dibujo de montañas es demasiado largo y complejo para describirlo aquí con detalle suficiente, sí hay un programa sencillo, MONTAÑA, que dibuja la sección transversal del Monte Mandelbrot. En MONTAÑA se pone de manifiesto la idea fundamental, consistente en ir desplazando al azar los puntos de subdivisión paralelamente a un eje vertical. El paisajista fractal parte de un único segmento horizontal. Se determina el punto central del segmento y se desvía arriba o abajo en una magnitud aleatoria. Seguidamente, se subdividen y alteran los segmentos rectilíneos resultantes. El proceso puede continuar por un proceso similar al de la técnica de subdivisión del triángulo.

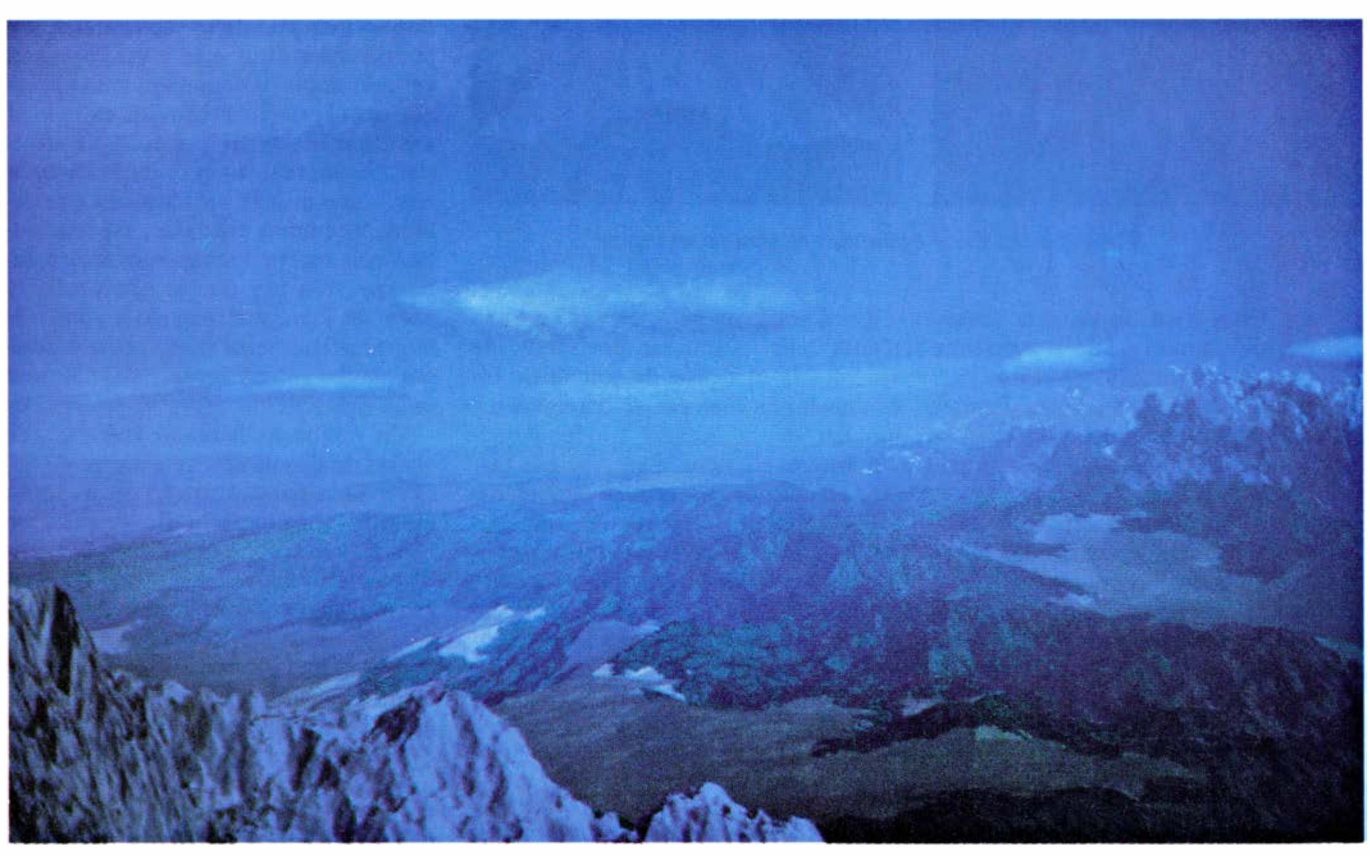
Para llevar control del perfil orográfico, MONTAÑA mantiene y actualiza dos tablas, llamadas *puntos* y *líneas*. Ambas constan de dos columnas y de un número suficiente de filas (2048, pongamos por caso) donde acomodar fácilmente la resolución de la pantalla de que dispongamos. Las dos columas de *puntos* contienen coordenadas y, las dos columnas de *líneas*, índices. Cada línea (segmento rectilíneo en realidad) está especificada como el par de posiciones de la tabla *puntos* que designan las coordenadas de los extremos del segmento. Dado que interesa ir observando cómo, por subdivisiones sucesivas, se va formando un perfil orográfico a partir de un polígono muy poco prometedor, MONTAÑA somete la ejecución de cada bucle al control del operador. Al final de cada ciclo del bucle principal el programa pregunta si se desea efectuar otra iteración. De ser así, la ejecución se bifurca hacia atrás, a la cabeza del programa.

El bucle principal convierte el sistema actual de puntos y rectas en nuevos sistemas, duplicando su contenido. Para lo cual el programa revisa la tabla *líneas* a razón de una fila cada vez, consulta los índices de los correspondientes puntos y recupera sus coordenadas de la matriz *puntos*. Armado con las coordenadas de los puntos extremos de un segmento dado, el programa calcula las coordenadas del punto medio, alterando aleatoriamente la coordenada *y* en el proceso. El siguiente listado algorítmico proporciona una base adecuada para el programa. En él, las variables *j* y *k* indican las filas de *líneas* y de *puntos* que en ese momento se están rellenando con los últimos resultados de la subdivisión. Las variables *pts* y *lns* registran los números de puntos y líneas que componen la montaña antes de iniciarse de nuevo la ejecución del bucle principal. Inicialmente *j* se toma igual a *pts* y *k* igual a *lns*. El índice *i* va desde 1 hasta *lns*.

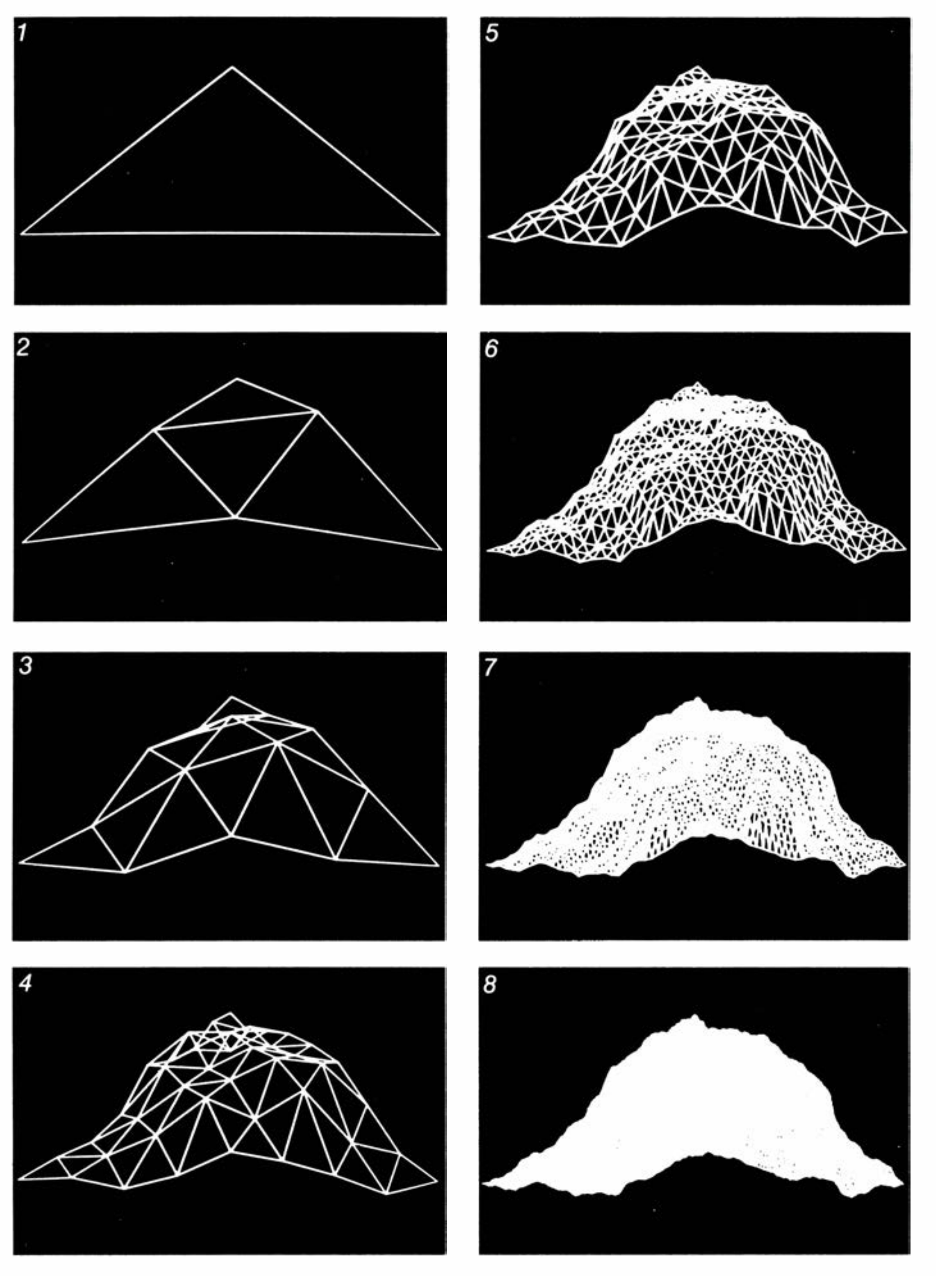
$j \leftarrow j + 1$
$k \leftarrow k + 1$
$a \leftarrow líneas\ (i,1)$
$b \leftarrow líneas\ (i,2)$
$x1 \leftarrow puntos\ (a,1)$
$y1 \leftarrow puntos\ (a,2)$
$x2 \leftarrow puntos\ (b,1)$
$y2 \leftarrow puntos\ (b,2)$
$puntos\ (j,1) \leftarrow (x1 + x2)/2$
$puntos\ (j,2) \leftarrow (y1 + y2) +$
$\quad + azar(gama)$
$líneas\ (i,2) \leftarrow j$
$líneas\ (k,1) \leftarrow j$
$líneas\ (k,2) \leftarrow b$

En buena medida, esta parte de MONTAÑA se explica por sí sola. Una vez computadas las coordenadas del punto *j*-ésimo, el índice *j* se almacena como segundo punto del *i*-ésimo segmento, y como primer punto del *k*-ésimo segmento. El primer punto del *i*-ésimo segmento es el mismo que antes, y el segundo punto del *k*-ésimo segmento es idéntico al segundo punto original del *i*-ésimo segmento, es decir, del segmento de índice *b*. Finalmente, una vez computado el bucle, deben reponerse los valores de *pts* y *lns* a los últimos valores de *j* y *k*, respectivamente. La variable *gama* la ajusta el usuario: determina el máximo valor de aleatoriedad vertical que puede darse al punto de subdivisión. Cada vez que se completa el ciclo debe dividirse por 2 esa variable, para conservar las fluctuaciones aleatorias en la escala de las características sometidas a variación. La función *azar*(*gama*) tiene por objeto expresar la selección de un número aleatorio comprendido entre 0 y el valor actual de *gama*.

Si las montañas que hay tras Frodo nos impresionan, no lo hacen menos los árboles y plantas que le rodean. Su aspecto es a un tiempo realista y fantástico. Parecen reales por la estructura de su ramificación, similar a la de los árboles y plantas genuinos. Parecen fantásticos porque no corresponden a especies familiares; el diseñador de



1. Montañas fractales generadas por ordenador, que imitan a las naturales



2. Por subdivisión de triángulos se genera un monte

gráficos tenía a su disposición tantos parámetros que no resistió la tentación de crear especies nuevas.

Estas nuevas "especies" se llaman plantas graftales, pues se basan en gráficos y son implícitamente de naturaleza fractal. Cuando digo que son de naturaleza fractal implícita pretendo expresar que, aunque no se haga, las reglas encargadas de generar la organización topológica básica podrían aplicarse hasta el límite de resolución de la pantalla. En breve, una vara o rama joven no se resuelve en una regresión indefinida de varitas. Una vez desarrollado el gráfico subyacente a una planta, puede convertirse en una miríada de especies de aspecto convincente, interpretando el gráfico en términos de tamaño, color, grosor, textura y demás.

Los gráficos subyacentes a una planta dada se generan por medio de sistemas *L*, una clase de gramáticas introducidas en 1968 por el matemático y biólogo danés Aristid Lindenmeyer. Un sistema *L* viene a ser, en esencia, un conjunto de reglas para derivar ristras de símbolos a partir de otras anteriores. Por ejemplo, con los números 0 y 1 y los símbolos [y] se puede generar una amplia gama de formas vegetales complejas merced a las siguientes reglas:

$0 \rightarrow 1[0]1[0]0$
$1 \rightarrow 11$
$[\rightarrow [$
$] \rightarrow]$

Para comprobar cómo funcionan las reglas, supongamos que se parte de la ristra consistente en un único 0. A continuación se sustituyen todos los símbolos de la izquierda por la ristra que tienen asignada a la derecha; se obtienen así, sucesivamente, las ristras siguientes:

0
1[0]1[0]0
11[1[0]1[0]0]11[1[0]1[0]0]1[0]1[0]0

Tales ristras pueden convertirse en gráficos arborescentes tratando cada número (0 o 1) como un segmento rectilíneo y, cada corchete, como un punto de ramificación. Los segmentos 0 y 1 son ambos de la misma longitud; para distinguirlos, lo típico es dibujar pelados todos los segmentos 1 y dibujar una hoja en el extremo de los segmentos 0.

El tallo (o tronco) de la ristra 1[0]1[0]0, pongamos por caso, consta de los tres símbolos que no están entre corchetes: un segmento 1, al que se superpone un segundo 1, y todo rematado por un segmento 0. De esta fórmula brotan dos ramas, cada una con un único segmento 0. La primera rama arranca del extremo del primer segmento del tallo y, la segunda, está fijada al extremo del segundo. Antes de analizar la figura 3 no estaría de más que los lectores se entretuvieran dibujando unas cuantas primeras generaciones de la estructura. Para mayor realismo, se pueden incorporar al modelo rasgos interpretativos adicionales. Se podría especificar que para cualquier vástago dado (independientemente de que sea el principal o no), las ramas hayan de ir brotando, por turno, a derecha e izquierda. No queriendo imponer tareas más arduas a los lectores que deseen programar fractales, me contentaré con sugerir formas vegetales compuestas sólo por trazos. Los profesionales de Pixar han llegado a convertir la gramática recién descrita en preciosas plantas, como las que se muestran en la figura 4.

Un programa llamado PLANTA, que consta de dos partes, se encarga de generar la *n*-ésima ristra de la sucesión anterior y de presentarla después en forma de gráfico compuesto por trazos rectos. En su primera fase, PLANTA guarda las ristras que genera en dos tablas de símbolos, llamadas *ristraA* y *ristraB*. Cada generación de plantas va ocupando alternativamente una de las dos tablas: la generación de una de las tablas se deduce de la generación anterior de la otra. No es estrictamente necesario almacenar símbolos en esas tablas; los números 0, 1, 2 y 3 servirán al caso, en tanto el programa vaya efectuando correctamente las sustituciones.

Las reglas del sistema L se concretan en enunciados condicionales. Por ejemplo, se puede adaptar el siguiente fragmento de código algorítmico para que convierta un 0 situado en la i-ésima posición de la *ristraA* en nueve símbolos alojados en la *ristraB*:

si *ristraA*(i) = 0, entonces
 ristraB(j) ← 1
 ristraB(j + 1) ← 2
 ristraB(j + 2) ← 0
 ristraB(j + 3) ← 3
 ristraB(j + 4) ← 1
 ristraB(j + 5) ← 2
 ristraB(j + 6) ← 0
 ristraB(j + 7) ← 3
 ristraB(j + 8) ← 0
 $j \leftarrow j + 9$

Aquí, 0 y 1 se representan a sí mismos, mientras que 2 y 3 denotan a [y a], respectivamente. Si el j-ésimo símbolo de *ristraA* es 0, el programa procede a instalar la secuencia 1,2,0,3,1,2,0,3,0 en nueve posiciones consecutivas de la tabla *ristraB* a partir del índice j (la primera posición de la tabla B que no se haya ocupado todavía). Un solo bucle, situado en la primera parte de PLANTA, contiene cuatro enunciados condicionales similares al mostrado, uno para cada uno de los cuatro símbolos a utilizar. El bucle se vale del índice j como referencia del símbolo de la nueva generación que se está procesando. El bucle se ejecuta tantas veces cuantas desee el artista graftal. Tras cada bucle, el programa PLANTA puede interrogar al usuario si desea, o no, otra ristra de símbolos, más larga.

La segunda fase de PLANTA, la fase gráfica, convierte en dibujos la ristra generada en la primera. Lo hace por recurrencia. En tanto no se encuentre ningún corchete izquierdo ([) o un 2, va trazando una secuencia de segmentos rectilíneos en una dirección dada. En cuanto se topa con el corchete izquierdo de un determinado par, el programa va trazando los siguientes segmentos en una nueva dirección, orientada a 45 grados en sentido antihorario respecto de la primera. El final del procedimiento queda señalado por la aparición del corchete derecho; entonces se dibuja una hoja (cuya forma y color dejo enteramente al capricho del lector). La aparición de un segundo corchete izquierdo provoca la repetición del proceso, salvo que ahora la dirección será de 45 grados hacia la derecha. El resto es automático.

En PLANTA se utiliza un factor de escala que es función de la complejidad de la planta que se quiera dibujar. La generación n-ésima, por ejemplo, tendrá, aproximadamente, unos 2^n pixeles de altura. Si la pantalla tiene 200 pixeles de resolución vertical, es preciso que los segmentos no midan más de $200/2^n$. Los lectores más ambiciosos tantearán sin duda, con distintas variantes de la gramática generatriz, diversos ángulos y formas de hojas. Si tales variantes se proyectan sobre una misma pantalla, aparecerá un paisaje de plantas y árboles, no muy realistas, esa es la verdad.

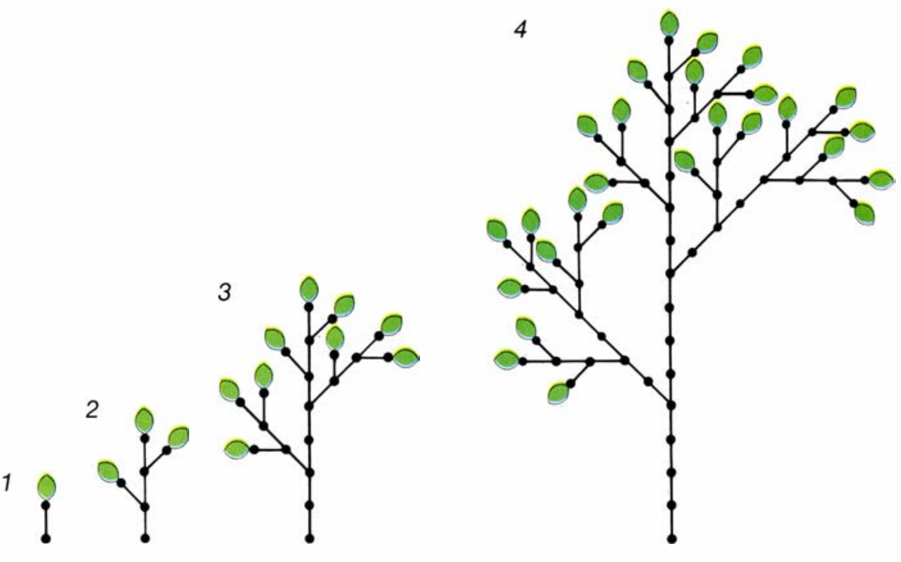
La bola de cristal del hipotético filme de Tolkien podría obtenerse con la técnica llamada "de seguimiento de rayos"; las almenas llameantes podrían simularse por trazado del movimiento de un gran sistema de partículas.

La técnica de seguimiento de rayos exige que se especifiquen tanto la geometría tridimensional de una escena como la posición de una fuente luminosa. Cuando la luz abandona su fuente, se embarca en una compleja historia de reflexiones y refracciones. El ojo de un observador situado en la escena captará algunos de los rayos de luz emitidos por la fuente, pero se perderá muchos otros, la inmensa mayoría en realidad. Para economizar tiempo y potencia de cómputo, la técnica de seguimiento de rayos opera en sentido contrario. Imaginemos por un momento que fuera del ojo de donde saliera la luz. Un amplio haz de rayos penetra en la escena. Cuando el rayo intercepta una superficie reflectante o refractante, sale desviado en una nueva dirección, según establecen las leyes de la óptica. En última instancia, el rayo acabará incidiendo sobre una superficie absorbente y tomará el color que le esté asignado a ella. Tal color se registra en el pixel correspondiente a la dirección del rayo original.

Vemos en la figura 5 un ejemplo de imagen generada por la técnica de seguimiento de rayos. Los rayos correspondientes a la escena del billar han tenido una historia relativamente simple. Empero, sobre la superficie de las bolas se distinguen, reflejados, el interior de una sala de billar y un hombre de pie que sostiene el taco mientras observa la jugada.

El gran sistema de partículas que podría emplearse en la generación de las almenas en llamas es desarrollo lógico de las nubecillas de puntos que simbolizan las explosiones en miniatura de los videojuegos. No obstante, el sistema de partículas de un Pixar es muchísimo más complicado que esas engañosas trapacerías. En cierta región de la memoria del ordenador vive, se mueve y se reproduce toda una pléyade de partículas. Bajo control del ordenador, cada partícula es un punto que se mueve de acuerdo con leyes dinámicas prescritas. Nacida en algún momento, se le permite moverse durante algún tiempo y quizá dar vida a nuevas partículas. Después, tal vez perezca.

Pudimos contemplar el espectacular funcionamiento de los sistemas de partículas en una escena de la película *Viaje a las estrellas II - La ira de Kahn*. Sobre un planeta muerto y cubierto de cráteres se lanza una "bomba Génesis". La bomba crea una anillo de extrañas y chisporroteantes llamas, que acaban por englobar el planeta entero. Cuando por fin se extinguen, la superficie aparece convertida en una lujuriante biosfera. Esos efectos los produjo Pixar en su primera encarnación, cuando todavía se llamaba Lucasfilm Computer Graphics Laboratory. El anillo de partículas en expansión lo formaban sistemas de partículas, algunas



3. Cuatro generaciones de una planta graftal



4. Plantas graftales generadas en Pixar

de las cuales daban lugar a un nuevo sistema de partículas entero. Los nuevos sistemas proyectaban violentamente hacia arriba, desde la superficie del planeta, avalanchas de partículas, que al ascender iban cambiando de color, mientras otras volvían a caer, por efecto de la gravedad.

Alvy Ray Smith, director de investigación y desarrollo de Pixar, me mostró las dependencias de la compañía cuando visité San Rafael. Smith es ya conocido de los lectores de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, por sus trabajos en autómatas celulares [véase "Juegos de ordenador"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1985]. Además de conocer a Smith, uno de los pioneros en enfocar con la técnica graftal la vida vegetal computarizada, conocí también a Loren Carpenter, cuya especialidad son las montañas fractales, y a William Reeves, a quien se deben los sistemas de partículas. En mitad de una explicación sobre programación de gráficos, Smith me dejó sorprendido al decirme que el negocio principal de la compañía no consistía tanto en la producción de efectos especiales para Hollywood como en la fabricación de un ordenador específicamente diseñado para tratamiento de gráficos, llamado, como cabía esperar, Pixar Image Computer.

5. Una imagen de bolas de billar generada por ordenador, que ilustra la técnica de seguimiento de rayos

En el corazón del Pixar Image Computer se encuentra una memoria de 24 megabyte, capaz de controlar 2000 por 2000 pixeles. Tal resolución es más que suficiente para la mayoría de las aplicaciones. Además, cada pixel está representado por 6 octetos, esto es, 48 bits de memoria, que bastan para albergar una copiosa información sobre su color y transparencia. Tan enorme memoria del Pixar está gestionada por cuatro procesadores de alta velocidad dispuestos en paralelo, totalmente programables. La potencia de cómputo de estos procesadores es de unas 40 millones de instrucciones por segundo, velocidad varios órdenes de magnitud superior a la de los ordenadores corrientes. La unidad de presentación de imágenes se comunica con la memoria a la velocidad de 480 millones de octetos por segundo.

Los primeros Pixar se entregaron en mayo de 1986. Están destinados a desarrollar brillantes carreras en preparación de imágenes en medicina, diseño ingenieril, percepción a distancia y animación. Incluso cabe que se utilicen para crear mi hipotética película.

El artículo de noviembre se dedicó a ciertas formas de decoración para la mente, llamadas empapelados: imágenes de ordenador casi repetitivas, pero que no lo son del todo; papeles pintados de un tipo nunca visto. En realidad, ya se conocían desde hace una generación motivos decorativos similares. Michael Rossman, escritor y comentarista político que vive en Berkeley, California, acuñó la frase "decoración para la mente" (*wallpaper of the mind*) en 1971. Rossman aludía entonces a los intrincados y sutiles motivos que se percibían con los ojos cerrados, tras la ingestión de LSD. Escribió Rossman: "Tenía el aspecto de un empapelado, pero no a listas, sino con motivos repetitivos: metódicas constelaciones de loros, estrellas de mar, bombillas, copos de nieve, manchas de Rorschach de nombre imposible, mudándose unas en otras, en orgiástica creatividad... las imágenes evolucionaban en cadena, naciendo unas de otras, como si una litografía de Escher, una Metamorfosis infinita y lineal, se hubiera convertido en película cinematográfica".

Los lectores recordarán que el más sencillo de los programas de decoración para la mente descritos en el artículo pertenecía a John E. Connett, de



6. *Una escena de la secuencia Génesis, de* **Viaje a las estrellas II**

la Univesidad de Minnesota. Según lo establecido en él, había que elevar al cuadrado las coordenadas de cada punto y sumarlas. El resultado se trunca a un entero. Si el entero es par, al píxel se le da color negro; si es impar, blanco. El aspecto del empapelado —repeticiones horizontales y verticales— puede explicarse en parte por efecto moiré: en la descripción anterior se encuentran implícitos dos motivos; es su superposición la que crea el efecto. El primer motivo es la rejilla rectangular de píxeles que componen nuestra pantalla de presentación. La segunda pauta es una serie de anillos concéntricos correspondientes a los puntos del plano donde el procedimiento de Connett engendra un número impar. El empapelado es fruto de motivos creados por interferencia repetitiva con las direcciones horizontal y vertical. Puede que cierto número de puntos consecutivos del reticulado horizontal y vertical caigan en la corona circular comprendida entre dos anillos; entonces el grupo siguiente caerá fuera, y así sucesivamente. Conforme va aumentando la distancia al origen, los anillos van haciéndose cada vez más finos, lo que garantiza la ocurrencia de impactos y fallos a lo largo de cualquiera de las líneas del reticulado.

Como si tuviera la intención de reforzar esas observaciones, Paul Braun, de Simi Valley, California, dejó que la impaciencia hiciera presa en él y le dominara. La pantalla de su ordenador tardaba tanto en quedar cubierta que optó por no construir el motivo entero, sino entresacar una muestra que presentara sólo los novenos píxeles, tanto en sentido horizontal como vertical. Comprimido de esa forma, el motivo no se parecía en nada al primitivo. En efecto, Braun había cambiado el tamaño de la rejilla y, de esa manera, alteró el motivo de interferencia.

Otto Smith, de Port Townsend, Washington, descubrió que podía alterar considerablemente el moiré sin más que cambiar la asignación de colores. Al igual que otros muchos lectores, Smith ensayó fórmulas distintas de la dada por Connett. Por ejemplo, ciertas sumas o productos de funciones trigonométricas engendran a modo de descabellados remolinos, que recuerdan vagamente aquellos motivos de tinta coloreada que solían adornar por el interior las cubiertas de los libros con encuadernaciones de calidad. Smith señala igualmente que en los gráficos computarizados se presentan a menudo motivos moiré y demás efectos de interferencia. En tal contexto se les conoce como efectos alias, o efectos máscara: tendencia a la aparición de artefactos o imágenes indeseables, que derivan de la digitalización de figuras con variaciones bastante regulares.

Me conmovió recibir una película en miniatura creada por Douglas W. Raymond, de Orinda, California. Consta de una secuencia de diminutas transparencias de las imágenes consecutivas del empapelado de Connett, al irse agrandando progresivamente el tamaño del reticulado. Las transparencias están fuertemente cosidas por un costado, y la película cobra movimiento dejando escurrir bajo el pulgar las hojas del librito. Raymond ha bautizado su producción “Small Bang with Aliases”, algo así como “Pequeña Gran Explosión con máscaras”.

Taller y laboratorio

Cómo cruzar un laberinto sin perderse ni aturdirse

Jearl Walker

¿Cuál es la mejor manera de adentrarse en un laberinto desde la puerta y encaminarse a una meta interior? ¿Hay algún modo de alcanzar ésta y regresar al punto de partida sin hacer dos veces el mismo camino? ¿Puede evitarse el dar vueltas interminablemente? Supongamos que alguien se da cuenta de que se ha perdido. ¿Cómo hallar el camino de retorno a la entrada sin adentrarse aún más en el laberinto? A medida que vayamos abordando estas preguntas, iré presentando algunos de los deliciosos laberintos de colores elaborados por Minotaur Designs.

Definamos algunos términos. Por entrada o puerta de un laberinto entendemos el punto en el que se inicia la búsqueda; suele hallarse en el perímetro. La meta es el punto objeto de la búsqueda. Puede estar en cualquier lugar del laberinto o ser una salida. Un nudo es una entrada, una meta o cualquier punto donde un camino se ramifica o muere. El camino que une nudos sucesivos se llama rama. Una ruta es una secuencia de ramas. Un muro es la linde de un camino. Si el laberinto es una caverna, el muro resulta patente; si es de un jardín, será un seto o terraplenes bajos que limitan y definen los caminos del laberinto.

Algunos laberintos tienen nudos únicamente en la entrada y en la meta. En ellos se sigue hasta el final una ruta sinuosa sin riesgo alguno de perderse. Los laberintos con nudos adicionales son más difíciles de salvar porque requieren decidir acerca de qué ramas explorar. Si éstas se eligen al azar, el visitante puede acabar dando vueltas sin objeto, sin que nunca alcance la meta e incluso regresando a la entrada. Hay laberintos que limitan las posibilidades exploratorias. Por ejemplo, sólo dejan recorrer una rama una vez, o en un solo sentido. En otros casos, el problema que se plantee quizá sea visitar determinados lugares del laberinto en un orden particular. Si el laberinto presenta varias rutas posibles hacia la meta, acaso se pida hallar la ruta en la que intervenga un número mínimo de nudos. Se hablará, entonces, de ruta mínima.

Si se dispone de un plano del laberinto, siempre se podrá encontrar por tanteo una ruta directa desde la entrada hasta la meta. Esta tarea se facilita sombreando las calles sin salida ya que, a medida que se extiende el sombreado, se hará patente una ruta directa.

Pero, ¿y si penetramos en un laberinto sin el plano ni los medios para confeccionarlo? ¿Cómo tomar las decisiones en los nudos para no perdernos?

Una técnica consiste en elegir la misma dirección en cada nudo. Por ejemplo, podríamos optar siempre por la rama situada más a la derecha. Si ésta carece de salida, regresaremos al nudo y tomaremos la situada más a la derecha siguiente. Puede que así acabemos atravesando dos veces las ramas, una en cada sentido, pero al final llegaremos a la meta. Al regresar a la entrada, podemos continuar eligiendo, en cada nudo, la rama situada más a la derecha, con la posibilidad de recorrer zonas nuevas del laberinto, o bien podemos seguir siempre la rama situada más a la izquierda y, con ello, reconstruir exactamente nuestra ruta hacia la meta. A esta técnica de elegir persistentemente la misma rama la llamaré de la mano, derecha o izquierda según el caso.

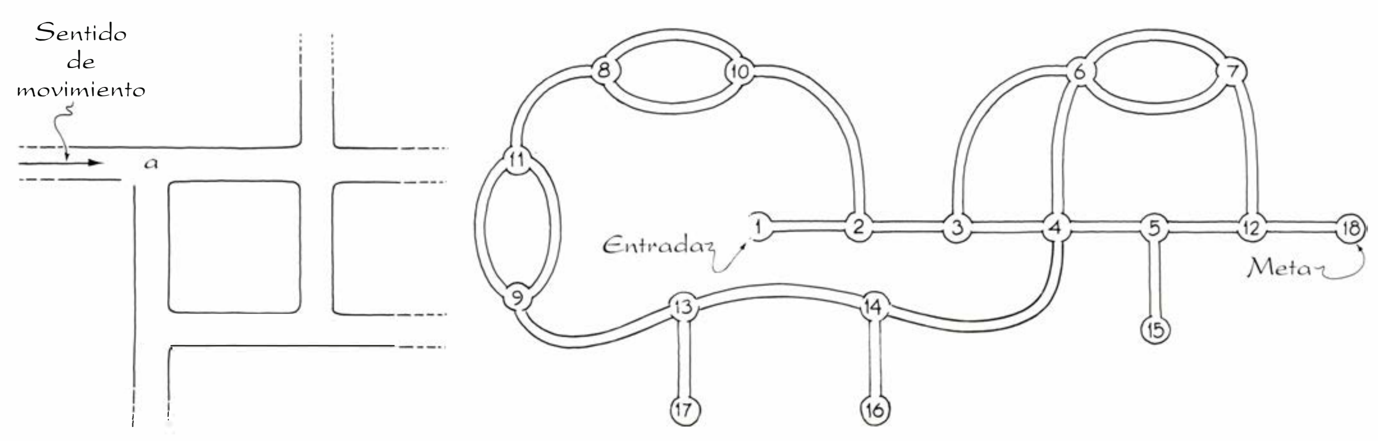
Esta regla de la mano funciona bien sólo en los laberintos simplemente conexos. Esta expresión indica que el enredo no contiene ninguna ruta cerrada, es decir, una ruta que haga un bucle sobre sí misma. Una ruta cerrada se obtiene con una isla de muros no conectada con otros muros del laberinto. Un laberinto con una o más islas se denomina múltiplemente conexo.

El primer laberinto de setos múltiplemente conexo se construyó en Chevening, en el condado inglés de Kent, hacia 1820. Tenía ocho islas [*véase la figura 1*]. Los nudos aparecen numerados, con el 1 para la entrada y el 18 para la meta. Supóngase que penetramos en este laberinto sin la ayuda de un plano y aplicamos la regla de la mano derecha en cada nudo. De ese modo recorreremos la secuencia de nudos 1-2-3-4-14-13-9-11-8-10-2-1, sin llegar nunca a la meta. Hasta podemos creer que hemos visto todo el interior, como sería realmente el caso si regresáramos a la entrada en un laberinto simplemente conexo.

La aplicación de la regla de la mano para explorar un laberinto multiplemente conexo fallará sólo si éste presenta una ruta cerrada en torno a la entrada o a la meta. Todas las demás rutas cerradas no plantean dificultades. Supongamos que nos estamos acercando a una isla interior [*véase la figura 2*]. Si empleamos persistentemente la regla de la mano izquierda, o la de la derecha, no podemos quedar atrapados en una ruta cerrada alrededor de la isla. Para quedar atrapados caminamos en sentido horario, debemos errar y elegir primero la rama izquierda en el nudo *a* y, después, elegir siempre las ramas derechas. Para quedar atrapados caminando en sentido antihorario debemos errar y elegir primero la rama derecha en el nudo *a* y, después, seguir siempre las ramas izquierdas. (Pero todo esto de poco sirve cuando entramos en el laberinto ignorando si ya caminamos alrededor de una isla o si la meta está protegida por una de ellas.)

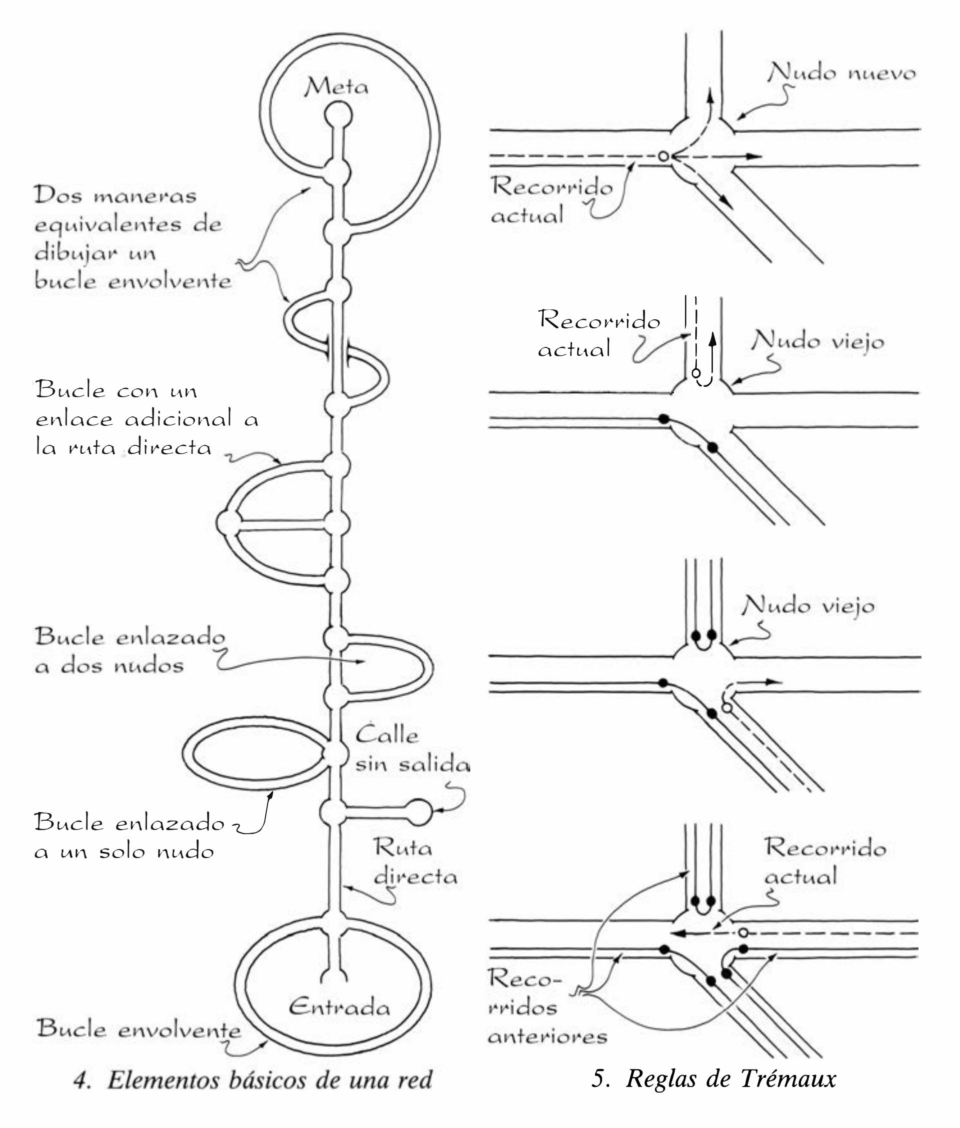
La complejidad de un laberinto puede reducirse mucho si el plano del mismo se deforma topológicamente para formar una representación mucho más simple, llamada red. En ésta, se conservan todos los nudos e interconexiones, pero se eliminan las contorsiones de los senderos. En la red del laberinto de Chevening, se ve enseguida la ruta directa a la meta 1-2-3-4-5-12-18. Otra ruta, la 1-2-3-6-7-12-18, sirve

1. *Plano del laberinto de setos de Chevening*



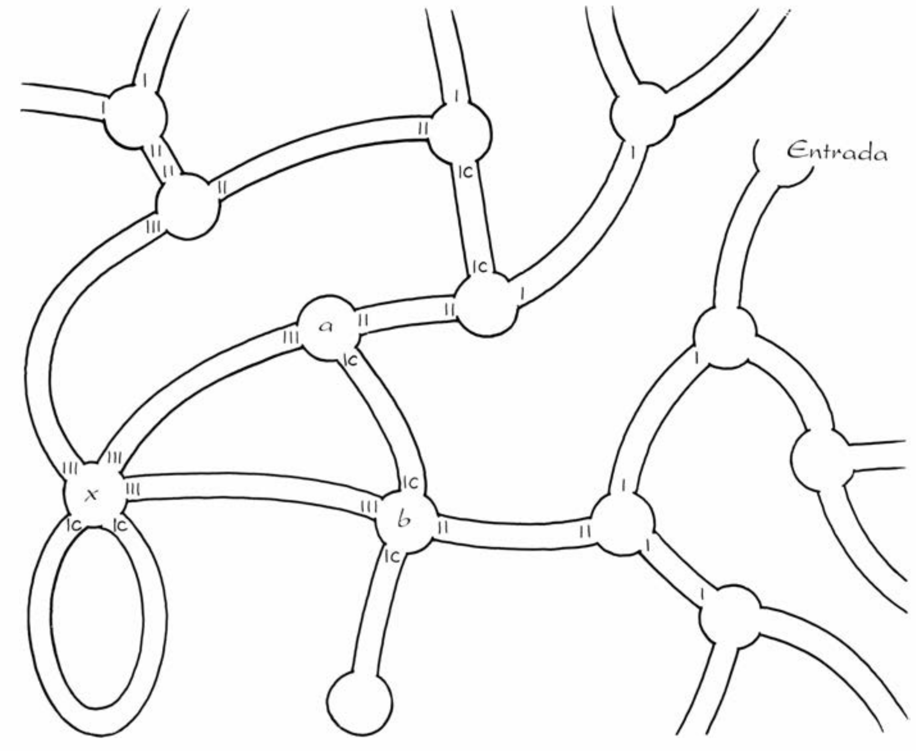
2. *Problema de la isla interior*

3. *Red del laberinto de Chevening*



4. Elementos básicos de una red

5. Reglas de Trémaux



6. Procedimiento de numeración para salir de un laberinto

también porque en ella interviene el mismo número de nudos. Cada bucle de la red se debe a una isla.

En una red, una ruta directa a la meta se dibuja en línea recta. Una rama sin salida sale de la ruta directa y no retorna. Una isla en la entrada crea una ruta que rodea al nudo de entrada. Puede cortar a la ruta directa en un nudo con cuatro ramas o en dos nudos. La exploración aplicando la regla de la mano fracasaría con esta ruta cerrada. Otro bucle rodea a la meta, neutralizando, de nuevo, la regla de la mano. Puede dibujarse asimismo una ruta envolvente pasando por debajo de la directa. Las islas interiores crean bucles que cortan a la ruta directa en uno o dos nudos. Adviértase que si penetramos en uno de tales bucles siguiendo la regla de la mano, acabaremos escapando del mismo y proseguiremos por la ruta directa hacia la meta. Es posible asimismo escapar de bucles más complicados con conexiones adicionales a la ruta directa.

Puesto que la regla de la mano no garantiza que se logre llegar a la meta, ¿cómo debería explorarse un laberinto? Se conocen diversas técnicas, pero la más citada se atribuye a un tal M. Trémaux en la publicación de 1882, *Récréations mathématiques*, de Édouard Lucas. Se ilustra en la figura 5, y en ella las expresiones "nudo viejo" y "nudo nuevo" consignan si un nudo ya fue visitado o no antes. Al entrar o salir de una rama, se marca la pared o el suelo por algún procedimiento. Siempre que se llegue a un nudo nuevo, se elegirá una rama cualquiera.

Llegando a una rama sin salida, regresaremos al nudo anterior. Si, al recorrer un camino no pisado previamente, se llega a un nudo viejo (tendrá marcas, por lo menos, en dos de las ramas), retornaremos al nudo que se acaba de dejar. Si nos encontramos en un camino ya pisado antes, se elegirá una rama nueva. Si esto no fuera posible, tomaremos una rama que hayamos atravesado sólo una vez. Este procedimiento es laborioso y nos llevará probablemente por una ruta larga, pero nos evitará todas las trampas.

Supóngase que entramos en un laberinto, pasamos por un número de nudos sin tomar notas ni marcar el camino y, entonces, nos damos cuenta de que nos hemos perdido. ¿Cuál sería el mejor procedimiento para regresar a la entrada sin adentrarnos, para nuestra desesperación, aún más en el laberinto? En 1959, Oystein Ore, de la Uni-

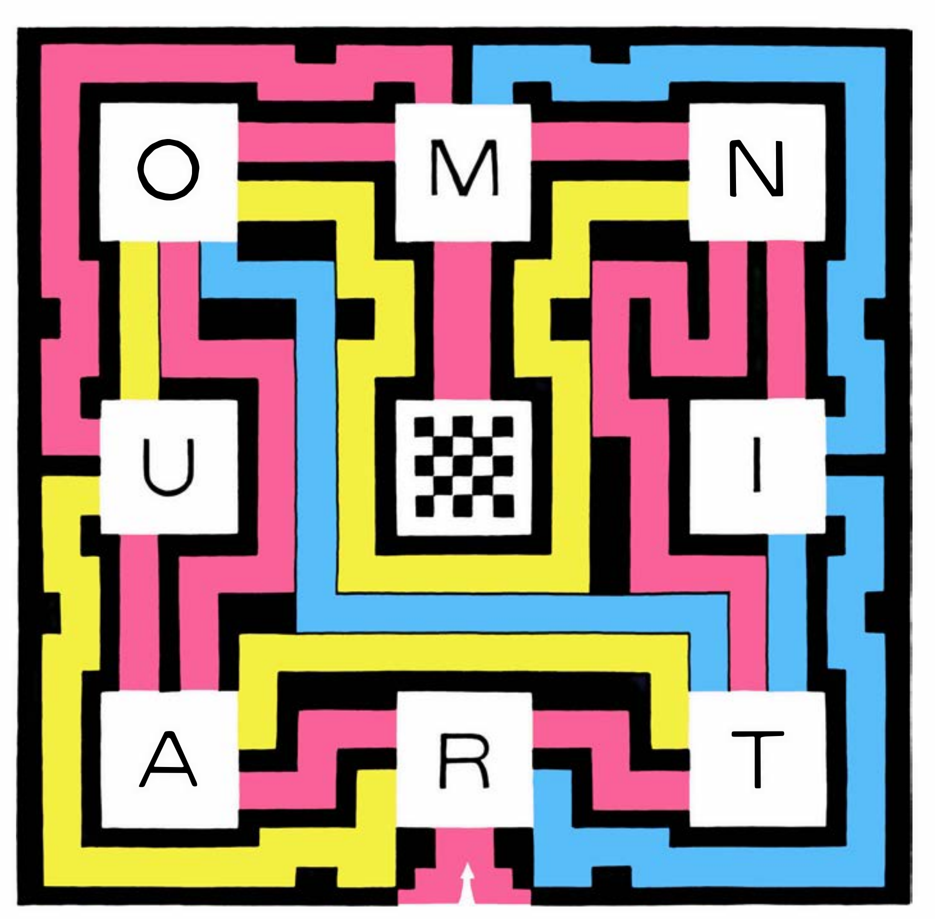
versidad de Yale, publicó un procedimiento para resolver tal situación.

Imaginemos que estamos en un punto x de la red de un laberinto en el que no sólo nos encontramos extraviados, sino que, además, hemos olvidado el número de nudos por los que hemos pasado [*véase la figura 6*]. Desde x exploraremos cada rama hasta llegar a otro nudo. Cuando penetremos en la rama, la marcaremos con 1. Si llegamos a un nudo con ramas nuevas, marcaremos la rama en la que estamos con otro 1 y regresaremos a x. Si llegamos a una calle sin salida, marcaremos la rama indicando que es cerrada cuando regresemos a x. Si una rama hace un bucle de tal modo que regresamos a x, marcaremos cada extremo de la rama indicando que es cerrada.

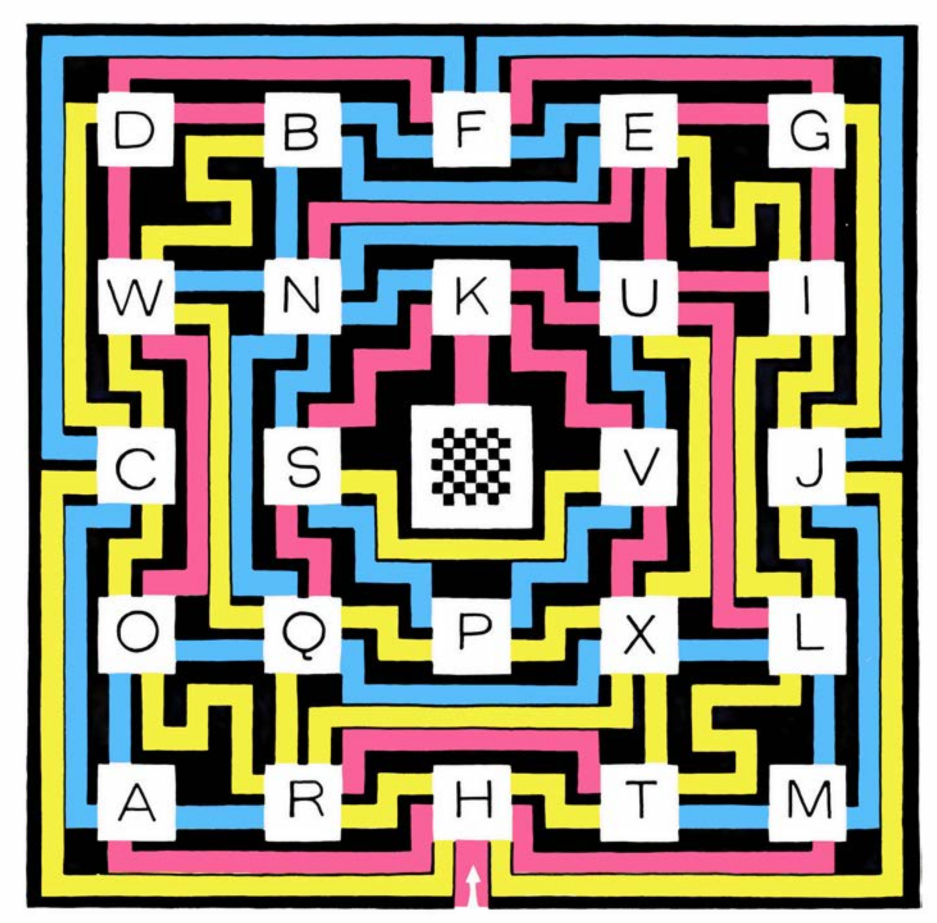
Seguidamente exploraremos cada una de las ramas no cerradas hasta una distancia de un nudo adicional. Al abandonar x, añadiremos otra señal de 1 a la entrada de la rama. Cuando salgamos de la rama en el nudo siguiente (al que habíamos llegado en el lance precedente), marcaremos ese punto con otro 1 (ese nudo tendrá, entonces, dos marcas). Al penetrar en otra rama del nudo, marcaremos la entrada con un 1. Si la rama es una calle sin salida, regresaremos al nudo que acabamos de dejar y la marcaremos indicando que es cerrada. Si llegamos a un nudo ya visitado desde alguna otra rama que parta de x, marcaremos cada extremo de la rama en que entonces nos hallemos indicando que es cerrada. Ejemplo de esto es la rama que enlaza los nudos a y b de la ilustración. Y regresaremos al nudo que acabamos de dejar.

Cuando hayamos finalizado las exploraciones desde x hasta una distancia de dos nudos en todas las direcciones posibles, regresaremos a x y comenzaremos a explorar hasta una distancia de tres nudos. Recuérdese añadir un 1 a cada rama al penetrar en ella y al salir. Adviértase que, en cualquier nudo alejado, podremos siempre determinar la dirección de vuelta a x comparando las marcas en las ramas: la de retorno a x es la del número más alto. En la ilustración se representan las exploraciones hasta una distancia de tres nudos. Ampliando las exploraciones hasta una distancia de cuatro nudos, alcanzaremos la entrada.

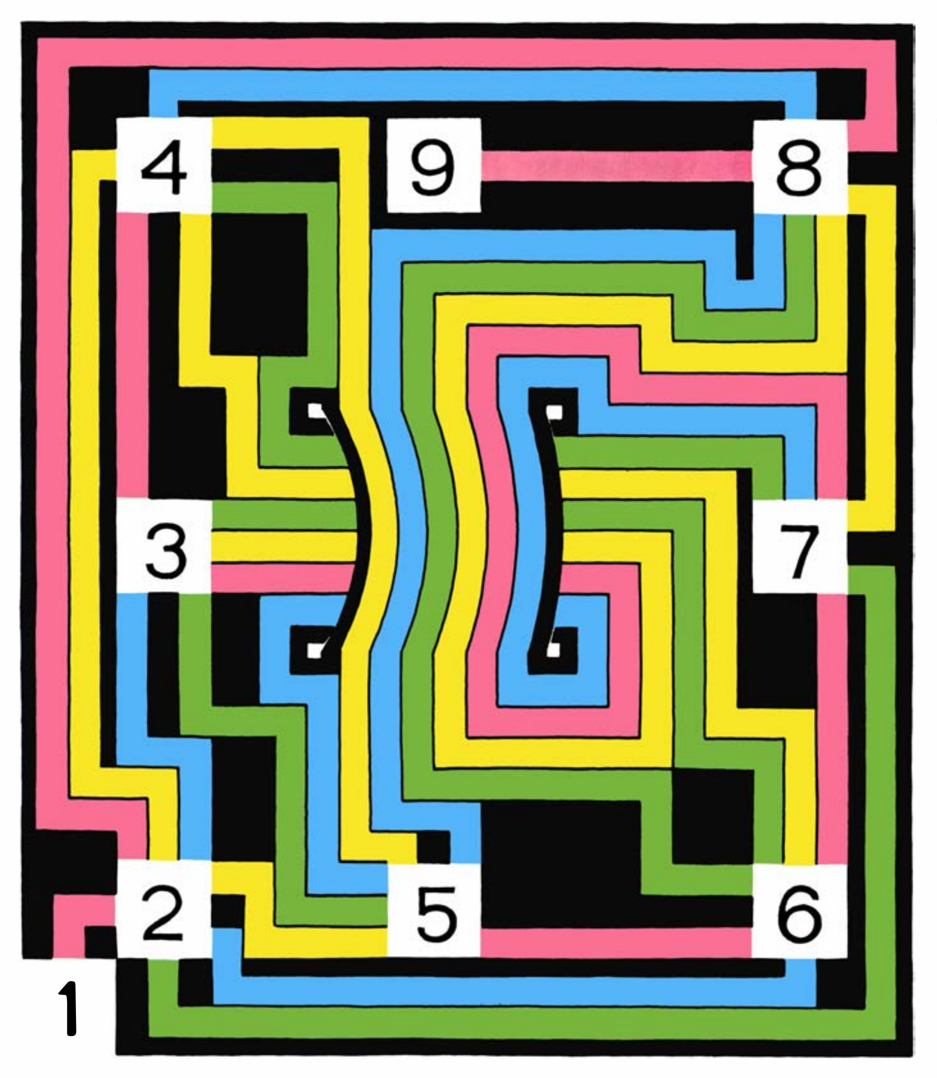
Minotaur Designs es una pequeña empresa dedicada a la construcción de laberintos de tamaño natural en Inglaterra y otros países. Uno de sus socios, Adrian Fisher, me ha enviado dibujos de tres de los extraordinarios laberintos



*7. "A*maze*ment" de Minotaur Designs*



8. "Sopa de Letras"



9. "Puente del Gigante"

de colores de la firma. El primero, llamado "A*maze*ment" fue originalmente presentado en Epsom, en una exposición. Su trazado puede seguirlo el lector con el dedo o un lápiz. Se entra en él por la senda roja que lleva al nudo *R* y se trata de alcanzar la meta del centro pasando por el mínimo de nudos. En cada uno de éstos hay que cambiar de color; por ejemplo, si llegamos al nudo *I* por el camino azul, no podemos dejarlo por otro camino que sea también de color azul.

La configuración del laberinto contiene muchos más nudos que los ocho indicados por las letras. Por ejemplo, el nudo *I* es, en realidad, dos nudos diferentes, a uno de los cuales se llega por una rama roja y, al otro, por una rama azul. Así, si se dibuja la red de este laberinto, hay que incluir un nudo para la *I* azul y otro para la roja.

El segundo de los laberintos de colores se llama "Sopa de Letras". En él también hay que cambiar de color en cada nudo. Empezando por la senda roja que lleva a *H*, ¿cuál es el número mínimo de nudos necesarios para llegar a la meta del centro? Este laberinto está ingeniosamente concebido. Si se intenta resolver hacia atrás, desde la meta, procedimiento normal entre los aficionados a los laberintos, el camino se pierde enseguida. Por su interior, delimitado por el cuadrado definido por *O, D, G* y *L*, cuesta abrirse camino. Muchos de los caminos que parten de la entrada forman bucle y retornan a la misma. Tras averiguar cómo se llega al interior, descubrí varias rutas directas con 11 nudos (contando la meta y considerando *H* como primer nudo), pero me costó más tiempo descubrir una ruta directa de 10 nudos. Creo que ésta es la ruta mínima.

En el tercer laberinto, llamado "Puente del Gigante", se impone una condición diferente en los nudos. En éstos hay que elegir una rama nueva de acuerdo con la secuencia rojo, azul, amarillo, verde. Si se entra en un nudo por una rama roja, hay que salir del mismo por una azul. Al verde le sigue el rojo, y así sucesivamente.

El centro de este laberinto contiene un puente y un paso de ramas bajo el mismo. ¿Cuál es el número mínimo de nudos que hay que atravesar para ir desde el nudo 1 hasta el 9, que es la meta? En la figura 10, se muestra la solución de Fisher (en forma de red). Adviértase que, al igual que en los otros laberintos de colores, la red contiene muchos más nudos de los que se aprecian a simple vista en el propio laberinto.

Las propiedades de las redes las esbozó inicialmente, en 1735, el eminente matemático suizo Leonhard Euler. Consideremos una red conexa. Un nudo se dice par o impar según el número de ramas que lo enlazan. Una ruta es una serie de ramas consecutivas en la que no se atraviese dos veces ninguna de ellas. Una ruta ocluida es aquella que acaba donde comienza. Llamamos ruta univiaria, o unitineraria, a la que atraviesa la red entera sin repetir una sola rama.

Euler estableció cuatro reglas generales relativas a las redes. (1) El número de nudos impares debe ser par o cero. (2) Si una red carece de nudos impares, puede atravesarse univiariamente comenzando en cualquier nudo. Además, cualquier ruta de ésas es ocluida. (3) Si una red posee sólo dos nudos impares, puede ser atravesada univiariamente por una ruta que comience en uno de ellos y acabe en el otro. Sin embargo, toda ruta que empiece en un nudo par no puede atravesar la red univiariamente. (4) Toda red que posea más de dos nudos impares no puede atravesarse univiariamente por una ruta. Puede explorarse por varias rutas sin pasar por una rama más de una vez. Si tiene $2n$ nudos impares, puede explorarse completamente con n rutas.

En la figura 11, aparecen ejemplos de estas reglas. En la primera red, el número de nudos impares es par. Comenzando en uno de los dos nudos impares, podemos atravesar univiariamente toda la red para finalizar en el otro nudo impar. Comenzando en el único nudo par, se necesitan dos rutas para explorar toda la red. La segunda red tiene una rama adicional. Vuelve a ser par el número de nudos impares. Como en este caso hay más de dos nudos impares, es imposible una ruta univiaria. Para explorar toda la red hacen falta, por lo menos, dos rutas. Se muestran dos ejemplos.

Muchas veces, pero no siempre, un laberinto presenta un nudo impar en la entrada y otro en la meta. Si los demás nudos son todos pares, es posible ir

desde la entrada, por todo el laberinto y hacia la meta sin atravesar ninguna rama más de una vez. Pero si hay un nudo impar más, aunque sea sólo uno, habrá que pasar al menos dos veces por una rama para que podamos explorar el laberinto completo.

El estudio de las redes, llamado actualmente teoría de grafos, se encuentra muy difundido en matemáticas, ingeniería eléctrica, procesos informáticos, proyectos de rutas y en muchos otros dominios. En la teoría de grafos intervienen redes de los tipos aplicables a los laberintos con una salvedad: no se permite que una rama forme un bucle de retorno al nudo del que sale. Pero, aún así, un bucle de ese tipo puede alterarse para adaptarlo a la teoría de grafos intercalando en el bucle un nudo artificial. En un laberinto, tal nudo sería trivial, sin que precisara de más decisión que la de abandonar la dirección que se lleve en el momento y regresar por la misma rama al nudo anterior antes de descubrir el siguiente.

La teoría de grafos ofrece un procedimiento elegante para abordar un laberinto en el que se nos pida hallar una ruta mínima. Se empieza construyendo una matriz de los enlaces entre los nudos sucesivos. La red de laberinto que se representa en la figura 12 tiene ocho nudos y su matriz es un cuadrado de ocho elementos de lado. Por elementos de la matriz se entiende el número de conexiones entre los sucesivos nudos. Por ejemplo, como entre el nudo 1 y el nudo 2 hay una conexión, el elemento de coordenadas 1 (vertical) y 2 (horizontal) es 1. Y siendo posible ir desde el nudo 2 al 1, el elemento 2-1 es también 1. Si entre nudos sucesivos hubiera dos conexiones, el elemento correspondiente sería 2. En todos los elementos vacíos se pone un 0. Llamaremos M a esta matriz; se observará que es simétrica con respecto a la diagonal que va desde la esquina superior izquierda a la esquina inferior derecha. Esta simetría es resultado del hecho de que toda rama puede recorrerse en ambos sentidos.

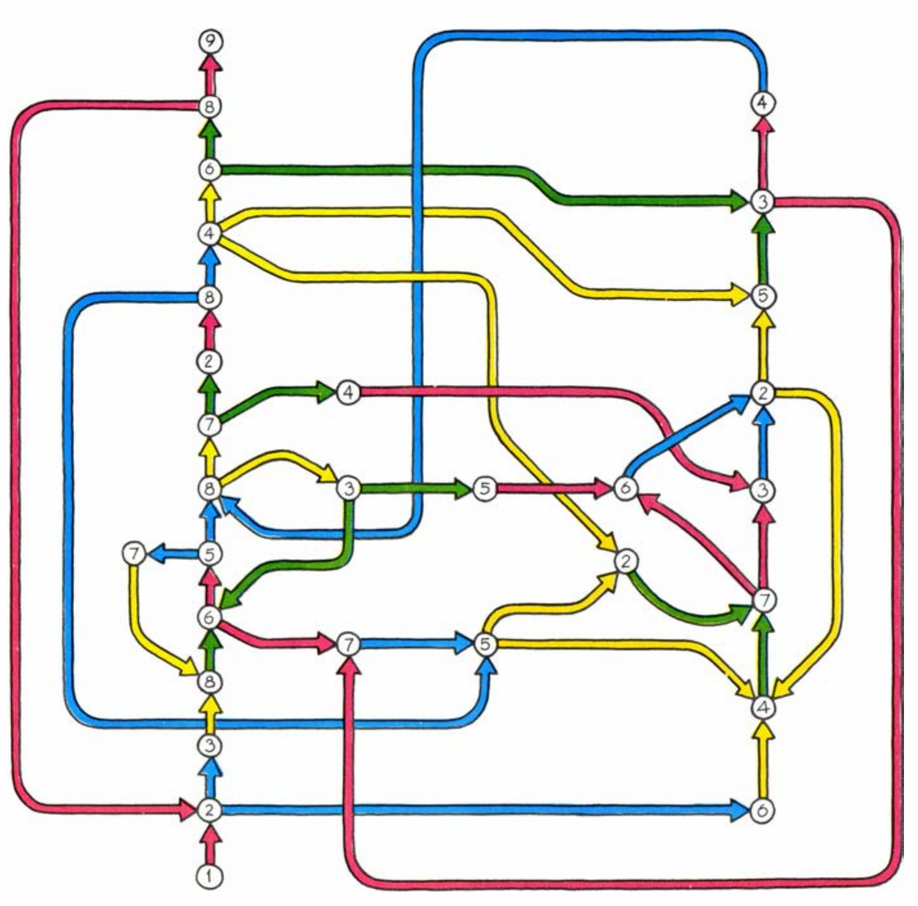
Si multiplicamos M por sí misma, obteniendo la matriz M^2, puede determinarse qué nudos están conectados por una ruta compuesta de dos ramas. El procedimiento del cálculo es como sigue. Primero se multiplica el primer elemento de la primera columna por el primer elemento de la primera fila. Seguidamente, se multiplica el segundo elemento de la primera columna por el segundo elemento de la primera fila. La multiplicación de elementos correspondientes prosigue de este modo y, cuando se ha finalizado, se suman los productos y el resultado se coloca en la matriz M^2 como elemento 1-1.

A continuación se opera con la primera columna y la segunda fila. Se multiplican los elementos correspondientes, se suman los productos y se coloca el resultado en la matriz M^2 como elemento 1-2. Después, se multiplican los elementos correspondientes de la primera columna y la tercera fila y el resultado será el elemento 1-3 de M^2. Cuando se haya acabado con las filas, volveremos a operar otra vez con todas ellas y con la segunda columna. Así, cuando se haya multiplicado la segunda columna por la primera fila, el resultado será el elemento 2-1 de M^2. Cuando se hayan multiplicado los elementos correspondientes de la segunda columna y la segunda fila, tendremos el elemento 2-2 de M^2. Seguiremos bajando por las filas y luego pasaremos a la tercera columna. Cuando hayamos recorrido todas las columnas, tendremos la totalidad de M^2.

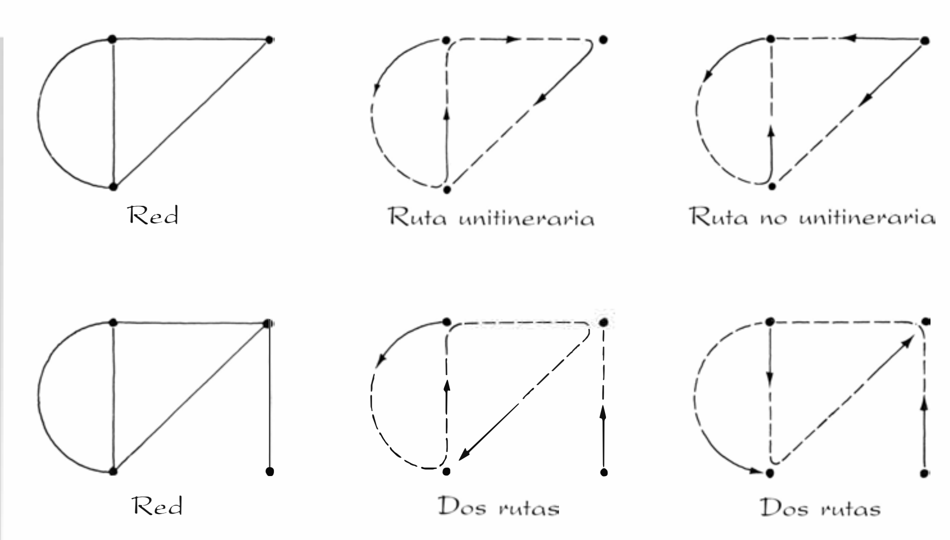
Los elementos situados en el eje de simetría de M^2 representan el número de modos en que podemos trasladarnos desde un nudo dado cualquiera a otro enlazado con el mismo y regresar a éste, con lo que una rama la pasaremos dos veces. El resto de los elementos representa el desplazamiento desde un nudo a otro a través de una ruta de dos ramas. O sea, el elemento 2-4 es 1, lo que indica que entre 2 y 4 sólo hay una ruta de dos ramas. El elemento 2-5 es 2, lo que manifiesta que hay dos rutas que enlazan 2 y 5 mediante dos ramas cada una. ¿Hay alguna ruta que lleve desde el nudo de entrada 1 al nudo de meta 5 mediante dos ramas? La respuesta es no, pues el elemento 1-5 de la matriz es 0.

Multiplicando M^2 por M para obtener M^3, se genera una matriz que da cuenta del número de maneras en que se puede ir de un nudo a otro siguiendo rutas de tres ramas. Por ejemplo, el elemento 1-4 es 1, lo que indica que hay una sola ruta de tres ramas que enlaza el nudo 1 con el 4: 1-2-3-4. Algunas rutas tienen repliegues; por ejemplo, de las seis rutas que conectan los nudos 2 y 3 mediante tres ramas, una es 2-3-4-3. ¿Hay alguna ruta de tres ramas que enlace los nudos 1 y 5? La respuesta es sí; esta vez el elemento 1-5 ya no es cero. Su valor 2 indica que hay dos rutas de tres ramas por las que se puede llegar a la meta desde el nudo de entrada.

El análisis matricial puede aplicarse



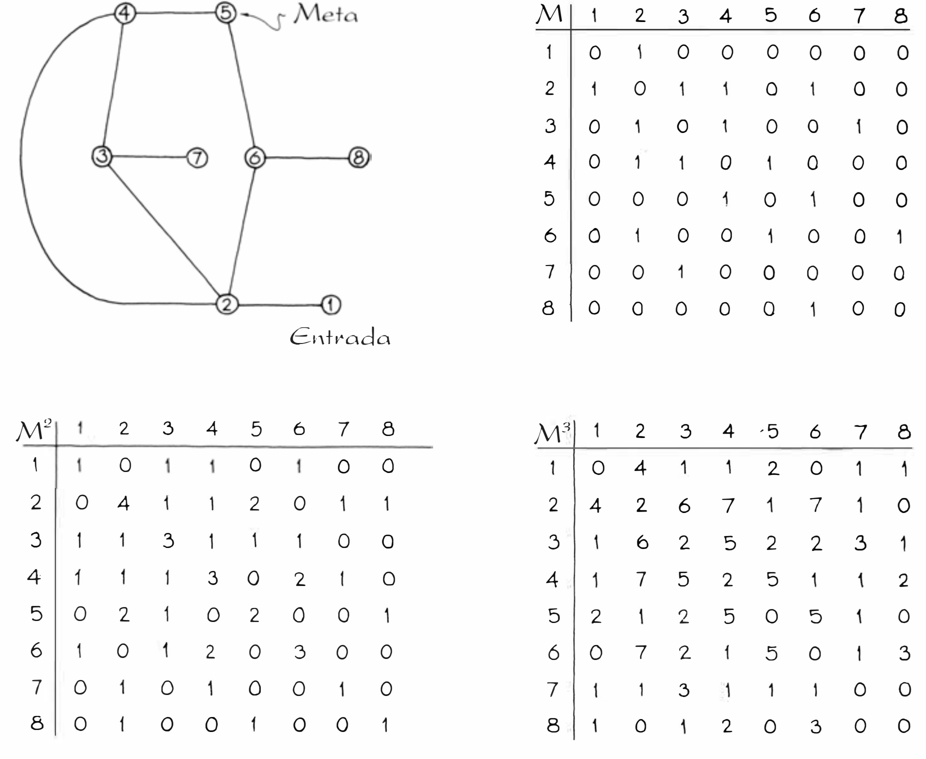
10. Red del "Puente del Gigante"



11. Rutas que exploran totalmente las redes

a laberintos más complicados y que no sean fácilmente resolubles a ojo. Para ello, se numeran los nudos y se construye una matriz con el número de conexiones entre los nudos sucesivos. Entonces, la matriz empieza a multiplicarse por sí misma hasta que en el elemento correspondiente al enlace entre el nudo de entrada y el nudo de meta aparezca un número distinto de cero. La potencia de la matriz será el número de ramas de la ruta mínima del laberinto. La matriz no revela dónde están las rutas directas, pero puede indicarnos si una ruta directa que ya hayamos encontrado es la ruta mínima.

Si un laberinto posee ramas de sentido único, su matriz se modifica. Por ejemplo, si podemos ir desde el nudo 4 al nudo 3, pero no en sentido opuesto, el elemento 4-3 será 1, pero el 3-4 será 0. Quien se divierta con este planteamiento matricial de los laberintos puede entretenerse en comprobar si la ruta mínima de la “Sopa de Letras” se compone de 10 nudos, tal como he afirmado, y si existe una ruta mínima única. Al precio de 3 libras para Gran Bretaña y Europa, Minotaur Designs (42 Brampton Road, St. Albans, Hertfordshire ALl 4PT, U.K.) facilita un ejemplar de *A Celebration of Mazes*.



M	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	0	0	0	0	0	0
2	1	0	1	1	0	1	0	0
3	0	1	0	1	0	0	1	0
4	0	1	1	0	1	0	0	0
5	0	0	0	1	0	1	0	0
6	0	1	0	0	1	0	0	1
7	0	0	1	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	1	0	0

M^2	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	0	1	1	0	1	0	0
2	0	4	1	1	2	0	1	1
3	1	1	3	1	1	1	0	0
4	1	1	1	3	0	2	1	0
5	0	2	1	0	2	0	0	1
6	1	0	1	2	0	3	0	0
7	0	1	0	1	0	0	1	0
8	0	1	0	0	1	0	0	1

M^3	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	4	1	1	2	0	1	1
2	4	2	6	7	1	7	1	0
3	1	6	2	5	2	2	3	1
4	1	7	5	2	5	1	1	2
5	2	1	2	5	0	5	1	0
6	0	7	2	1	5	0	1	3
7	1	1	3	1	1	1	0	0
8	1	0	1	2	0	3	0	0

12. Matriz representativa de la red de un laberinto

Libros

Futuro de la biología y ayer de la medicina

Juan Ramón Medina y Agustín Albarracín

ADN RECOMBINANTE: INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA GENÉTICA, por James D. Watson, John Tooze y David T. Kurtz. Editorial Labor S.A., Barcelona, 1986. Es de sobra conocido que la escritura nos permite superar las estrictas limitaciones de tiempo y espacio a que nos sujeta la comunicación verbal. Es menos conocido, pero no menos importante, que otra ventaja del leer sobre el escuchar es que en el primer caso el ritmo de asimilación lo impone el que lee y en el segundo el que habla. Un mismo texto será leído a muy distintos ritmos por diferentes individuos, según su conocimiento, interés y capacidad, pero una conferencia tendrá que ser escuchada, o, aún peor, oída, por todos al ritmo, excesivamente lento para unos y rápido para otros, que imponga el conferenciante. Habida cuenta de lo anterior, no podemos sino felicitarnos de que el traductor de la obra "Recombinant DNA: an Introduction to Genetic Engineering", publicada por W. H. Freeman and Co. en 1983, haya sido el profesor Enrique Cerdá Olmedo, catedrático de genética de la Universidad de Sevilla, pues así podemos gozar de su reconocido amor a la precisión y corrección expresiva y de su profundo conocimiento tanto de la lengua castellana como de la inglesa, sin vernos abrumados por el ritmo verbal del que, tanto en inglés como en castellano, suele hacer gala.

En corto: se trata de un libro bien traducido, con algunas aportaciones terminológicas interesantes, como la de restrictasa por endonucleasa de restricción, la de cifrar por el feo e impreciso codificar o la denominación de plásmidos transbordadores a los que se pueden replicar tanto en una bacteria como en una levadura o, en general, en dos especies muy distintas. También es de agradecer que se nos hable de deleciones y no de "delecciones", como nos tenían ya casi acostumbrados ciertos autores de genética molecular: ¿por qué no "inserciones"? Otros términos son más discutibles, como el de borrones de Southern para las bandas o el que las siglas de los ácidos nucleicos sean ADN y ARN, en vez de DNA y RNA como recomienda la Real Academia de la Lengua; es cierto que ADN corresponde mejor que DNA para referirse al nombre completo en castellano de esa sustancia, pero suele decirse ATP y no TFA para referirse al trifosfato de adenosina.

Aunque en esta ocasión se necesita algún conocimiento de causa para captarlo, no falta en la versión original el sutil sentido del humor que el profesor Watson exhibió en "La doble hélice". Es, por así decirlo, ironía para iniciados. Basten dos ejemplos. Primero, cuando en la página 47 se nos dice que justo antes de que empezara la revolución de la ingeniería genética la genética molecular parecía agotada y de ahí que "tal vez para evitar perder el tiempo algunos de los que más habían aportado al estudio del almacenamiento de la información genética en el ADN dejaran la genética molecular y comenzaron nuevas carreras en neurobiología" seguramente se tiene en mente al codescubridor de la estructura del ADN, Francis Crick. Segundo, cuando en el pie de la figura 16.10 de la página 166 podemos leer: "Método hipotético para clonar ratones por trasplante de núcleos" y el dibujo esquematiza el método que Illmensee y Hoppe dijeron haber seguido para clonar ratones en unos experimentos que nadie logró repetir, y de los que se sospecha que pueden ser un fraude científico, la palabra "hipotético" adquiere toda su intención.

El libro está escrito con la claridad que ya exhibió el profesor Watson en su *Biología molecular del gen*. Al igual que entonces se practica ahora el método del aforismo enunciativo que luego se comenta o explica brevemente. Se trata de un estilo que empieza a ser canónico en los libros científicos americanos y cuyo ejemplo más célebre es la *Bioquímica* de Lubert Stryer. Según los teóricos de la comunicación, dicho estilo, en el que el hilo conductor está implícito en la sucesión de epígrafes y no explícito en el texto, obedece a la "tendencia a descomponer el mensaje en píldoras fácilmente asimilables" y, siempre según esos teóricos, es una respuesta de la literatura al reto televisivo, que, al requerir mucho menos esfuerzo, sitúa al potencial lector en desventaja frente al potencial televidente. De ahí que el texto tienda a hacerse cada vez más fácil. En buen acuerdo con dicha teoría, nuestro libro es de muy fácil lectura, ameno, asequible y prima la visualización sobre la lectura. Este tipo de libros, que podrían responder al anuncio "Mi vida es un clip", tiende cada vez más a que su texto se convierta en un mero comentario de figuras esquemáticas autoexplicativas. Corolario: el lector debe dedicar mucha atención a los pies de las figuras, pues ahí, y no en el texto principal, están los detalles de cómo se realizaron los experimentos clave.

La ya comentada facilidad de asimilación típica de ese estilo se ve reforzada por la afortunada decisión de dedicar los cuatro primeros capítulos a describir los principios básicos de la genética molecular, lo que permite que el libro sea accesible incluso a los que, antes de leerlo, no conozcan bien o ignoren dicho campo. Es, por tanto, válido tanto para el universitario como para el profesor de enseñanza media que quiera mantenerse al día. Pero este estilo tiene también sus costes, en particular que resulta un tanto dogmático, ya que no suelen explicarse las pruebas experimentales que apoyan cada aserto; la prueba, en el sentido de contraste, se sustituye por la ilustración, y el discurso deductivo por la yuxtaposición de imágenes.

En este libro dicho lastre se ve algo aliviado por el hecho de que cada capítulo va acompañado de una detallada bibliografía, dispuesta, como el capítulo, por epígrafes, y que busca aportar referencias didácticas para profundizar en cada "pregunta". Es, por tanto, también útil como libro de consulta. Siempre en el estilo didáctico y claro, que prima la información sobre la crítica, el libro contiene unos apéndices finales en los que se mencionan las principales efemérides de la ingeniería genética, con fotografías de sus protagonistas incluidas; un listado de restrictasas con sus secuencias diana y un breve listado de otras enzimas para manipular los ácidos nucleicos. Incluye también el habitual y muy útil índice de materias, pero no índice de autores, algo sorprendente y lamentable en un texto en el que se citan continuamente fechas y científicos, incluso por su nombre de pila. Esperamos que la próxima edición subsane esta deficiencia.

En el conjunto de los libros sobre ingeniería genética se detectan tres corrientes: una que se centra principalmente en los aspectos aplicados, económicos; una segunda que se preocupa de los aspectos éticos, políticos y filosóficos, y una tercera que se centra en los aspectos científicos, de método y contenido de esa rama de la ciencia. Nuestro libro se inscribe claramente en esta tercera corriente. Como se señala en el prefacio, Watson y Tooze ya han escrito otro libro, *The DNA story*, para dar su versión de las facetas sociopolíticas de la ingeniería genética, aspectos que, como dicen: "han quedado asociados al nombre de Asilomar. Destacados biólogos moleculares recomendaron casi unánimemente reglas sobre el uso del ADN recombinante en una reunión que tuvo lugar en 1975 en ese centro de conferencias de la costa californiana". Actualmente esas reglas se han relajado mucho, los temores a posibles catástrofes genéticas no se han confirmado, al menos por el momento, y en esta obra los autores ya ni los comentan: han escrito un libro de ingeniería genética y no sobre ingeniería genética. Sí dedican un capítulo, el último, a la industria genética molecular, pero también más desde un punto de vista científico que gerencial. Describen, por ejemplo, las aplicaciones ya maduras de la ingeniería genética a la industria farmacéutica, como la producción de insulina o de interferones, pero no las vicisitudes del "venture capital" o de las exenciones fiscales a las empresas de alta tecnología.

El grueso del libro, comprendido entre los capítulos iniciales de introducción a la genética molecular y el último, dedicado a las aplicaciones industriales, trata propiamente de ingeniería genética. Los autores entienden por tal todo aquello que tenga que ver con reordenaciones de los ácidos nucleicos; de ahí que incluyan un capítulo sobre la maduración, por corte y remiendo, de los transcritos eucariontes para dar mensajeros maduros, y otro capítulo sobre genes móviles y transposones y aún un tercero sobre reordenación del ADN germinal para formar genes maduros de anticuerpos. Dado ese enfoque, que en mi modesta opinión es esencialmente correcto, es de criticar el que en el último capítulo mencionado no se hable para nada de anticuerpos monoclónicos, un tema de gran importancia y actualidad.

Si lo miramos con ojos de sistemático veremos con agrado cómo el libro no deja fuera ningún gran grupo taxonómico, excepto los hongos filamentosos, pero justo es decir que se trata de unos organismos cuya ingeniería genética es la más atrasada de todas. Sí aparecen capítulos sobre la ingeniería genética de virus, bacterias, levaduras, plantas, animales y de nuestra especie. El cubrir todas esas áreas con suficiente profundidad en una obra de extensión moderada es uno de los principales méritos del libro.

Un punto final: el título no parece muy afortunado ya que moléculas de ADN recombinante lleva produciendo la naturaleza en cantidades ingentes desde antes de que los primates antecesores de los actuales ingenieros genéticos aparecieran en escena; como tampoco se habla para nada en el libro del mecanismo y tipos de la recombinación, hubiera sido más lógico restringir el título a su segunda parte: "Introducción a la ingeniería genética", que es de lo que realmente se trata. (J. R. M.)

Historia General de la Medicina Española, por Luis S. Granjel. Ediciones Universidad de Salamanca; Salamanca, 1978-1986. "Finis coronat opus", "la conclusión corona la obra", podría servir de título a estos urgentes comentarios. Y pienso que son varios los motivos que no sólo permiten sino que aconsejan acudir a la vieja sentencia latina. Hasta tres veo yo en esta ocasión. De modo más inmediato, porque el volumen quinto, consagrado a "La Medicina Española Contemporánea", es, en efecto, la conclusión de una magna empresa iniciada en 1978, y que a lo largo de ocho años nos permite contar con esta *Historia General de la Medicina Española* (*La Medicina Española Antigua y Medieval*, 1981; *La Medicina Española Renacentista*, 1980; *La Medicina Española del Siglo XVII*, 1978; *La Medicina Española del Siglo XVIII*, 1979; *La Medicina Española Contemporánea*, 1986). Más mediatamente, porque esta obra constituye la culminación de una tarea historiográfica iniciada allá por los comienzos de los años cincuenta, y que a través de más de doscientas publicaciones, entre libros, estudios, artículos, conferencias, prólogos y discursos, nos ha permitido conocer de modo magistral, aunque hasta ahora parcialmente, el devenir entero de nuestra medicina española. Y por fin, de modo biográfico, porque la conclusión de la *Historia General de la Medicina Española* viene a coincidir con el trámite, ineludible y forzoso, aunque absurdo, de la jubilación académica del autor como catedrático de la Universidad de Salamanca, a la que durante más de treinta años ha servido y prestigiado con su magisterio y con su labor investigadora, dentro de los muros renacentistas del viejo Palacio de Fonseca, sede de su Instituto de Historia de la Medicina Española.

Por tanto, *la conclusión corona la obra* en el triple sentido que acabo de aludir. Pero toda conclusión exige, no sólo de parte del que la alcanza sino también del espectador que la contempla, una reflexión que alcance a mostrarnos el sentido profundo de la obra. A ello voy a consagrar estos comentarios.

La historiografía médica española ha venido siendo desde el siglo XIX –al margen de los esbozos que en el transcurso del Medioevo y del Mundo Moderno pudieran aducirse– un bien intencionado esfuerzo por hacernos conocer, a través de repertorios biobibliográficos, la vida y la obra de cuantos médicos han sido a ello acreedores a lo largo de nuestra historia. Se inició la aventura a comienzos de la centuria, con la *Epidemiología española* de Joaquín Villalba (Madrid, 1803, 2 vols.), algo más que un simple repertorio en el sentido antes aludido, ya que se consagraba a la exposición de la historia cronológica de las pestes, contagios, epidemias y epizootias padecidas en España desde los cartagineses hasta finales del siglo XVIII: obra benemérita, valiosa en más de un sentido, pero temáticamente limitada, como su propio título expresa. A continuación, los dos "monumentos" de nuestra historiografía decimonónica: la *Historia bibliográfica de la Medicina Española*, de Antonio Hernández Morejón (Madrid, 1842-1852, 7 vols.) y los *Anales Históricos de la Medicina General y bio-bibliográficos de la española en particular* (Valencia, 1841-1846, 8 vols.), ambas meros repertorios, como queda expuesto, de biografías y producción bibliográfica, útiles a veces, errados o limitados en ocasiones, expresión siempre de una visión de la historia de la medicina propia de su época, cuando aquélla, como bien nos lo ha mostrado Diego Gracia, era en España, al modo francés, simple disciplina filosófica y propedéutica, mostrativa de lo que la medicina había sido hasta entonces, pero carente del espíritu investigador, hermenéutico y científico que por entonces nacía en la universidad del ámbito germánico.

Tras esta primera etapa de nuestra literatura histórico-médica, ininterrumpidamente proseguida por obras menores y no tan ambiciosas, al filo de los siglos XIX y XX publicaba Luis Comenge y Ferrer una inconclusa obra, *La Medicina en el siglo XIX* (Barcelona, 1914),

cuyo rigor, buena información e inteligente utilización documental podrían haber sido algo más que promesa, no cumplida por la prematura muerte del autor. Desde entonces, y hasta nuestra guerra civil, poco más; recordemos tan sólo *La Historia de la Medicina Española* y los parágrafos que el mismo autor dedica a ella en su *Historia contemporánea de la Medicina*: me refiero a la obra, no muy afortunada, de Eduardo García del Real, catedrático en los albores de la contienda en la Facultad de Medicina de la Universidad que entonces se denominaba Central de Madrid.

A la conclusión de nuestro conflicto bélico va a cambiar totalmente el panorama de la docencia, cultivo e investigación histórico-médica en España, bajo el magisterio ejemplar de Pedro Laín Entralgo, buen conocedor de la obra que por entonces desarrollan en Europa Sudhoff, Sigerist y sus inmediatos discípulos. Con su personal magisterio en la universidad y con su creación del primer Instituto de Historia de la Medicina en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Laín supo dar a la disciplina, desde los años cuarenta, el nivel científico e investigador que los tiempos requerían. Pero algo más quiso y supo hacer: crear una escuela de docentes e investigadores, a la cabeza de los cuales figura por propio derecho Luis S. Granjel. Uno y otro han referido múltiples veces que al obtener S. Granjel la cátedra de Salamanca, en 1955, Pedro Laín le aconsejó consagrar todos sus esfuerzos al estudio de la historia de la medicina española, tan precisa de él según nos muestran los párrafos anteriores. Y cumpliendo venturosamente la encomienda, a esa medicina española, a sus fuentes bibliográficas, al esclarecimiento de los protagonistas de esa historia, ha dedicado su vida Granjel, y a esta empresa ha incorporado los discípulos que hoy constituyen su escuela y que se formaron en su Instituto.

Todo lo cual, ahora se ve claro, presta pleno valor y sentido al significado que posee la conclusión de esta *Historia General de la Medicina Española*, obra única en nuestra historiografía médica y remate de una vida académica e investigadora que culmina con su publicación.

Vengamos a la sucinta descripción de la obra. En sus cinco volúmenes, al comienzo lo anoté, expone S. Granjel la historia de la medicina española desde la Antigüedad hasta nuestra guerra civil, etapa en la que voluntariamente da por concluido lo que es historia y a partir de la cual él mismo se siente protagonista y coetáneo del quehacer médico en nuestra patria. Y salvo el volumen primero, en el que por razones obvias el esquema expositivo es diferente –dos grandes partes en él: 1. "Génesis de la medicina española": medicina antigua y medicina hispanoárabe; aquélla en sus etapas prerromana, hispanorromana e hispanogoda; ésta, con el estudio de la relación sociedad-enfermedad así como con la consideración de sus principales figuras peninsulares. 2. "Medicina medieval": en la que expone la recepción del saber médico y la lucha contra la enfermedad–, los cuatro volúmenes restantes mantienen una misma y análoga estructura.

Apelando al fructífero concepto que Laín ideó para el estudio de la anatomía –el de *la idea descriptiva*– podríamos decir que S. Granjel se acerca a la historia de la medicina española, tanto en el mundo moderno como en el contemporáneo, considerándola como un edificio apoyado en la sociedad de cada una de las épocas, que describe inicialmente, para exponer a continuación, en cada uno de sus períodos constitutivos, las características de las dos grandes alas que en ella se sustentan: una más dinámica, "la lucha contra la enfermedad", otra más estática, "los saberes médicos" en que se ampara. De este modo, tras hacernos ver las características fundamentales de las variantes sociedades que prestan suelo al ejercicio y a la formación profesionales, nos muestra en dos amplias partes, al pormenor, las peculiaridades que permiten aquel ejercicio y esta formación. Primero, las distintas generaciones médicas que constituyen cada etapa, las instituciones donde obtienen sus grados, el modo y características de su ejercicio profesional, las relaciones entre la sociedad y la enfermedad y entre ésta y la medicina popular. Y una vez caracterizado así el médico y su ejercicio, el profesor S. Granjel nos lleva a conocer los saberes médicos que fundamentaron tal ejercicio en cada período: la realidad humana –saberes morfológicos y fisiológicos–, la medicina clínica, las epidemias, la cirugía general y sus especialidades, la terapéutica. Cada volumen, por supuesto ajustado dentro de este esquema o "idea descriptiva" a las especiales características de cada período histórico, concluye con la bibliografía pertinente y un índice onomástico.

Algo querría comentar en relación con la bibliografía: aparte del valor general de la obra, ya apuntado, las referencias bibliográficas que acompañan a cada uno de los cinco volúmenes constituyen un riquísimo material para quien desee conocer exhaustivamente las fuentes de cada tema. Pero además, pienso que esta riqueza bibliográfica da muestra de la generosidad del autor, que ha querido así que no quede inédita ninguna aportación a la historia de la medicina española, por modesta que tal contribución haya sido: una lección más de magnanimidad, en esta época en la que, por lo general, tan cicateramente se ocultan los méritos o las simples aportaciones ajenas.

Cada volumen, en fin, aparece ilustrado con una riquísima iconografía que, como el autor subraya, no constituye mero aporte ornamental sino que intenta ser una ayuda didáctica para la mejor comprensión de la exposición.

Y al llegar al final de estas reflexiones, caigo en la cuenta de la impropiedad de su título. El volumen 5.º de la *Historia General de la Medicina Española*, en efecto, no corona *la* obra, sino *una* obra de Luis S. Granjel. Porque, afortunadamente para todos cuantos en España nos dedicamos al cultivo de la disciplina, la jubilación académica no es sinónimo de jubilación biográfica; y en este sentido –ahí están su *Historia de la Medicina Vasca*, Salamanca, 1983; su *Historia política de la medicina española*, Salamanca, 1985– *la* obra de Granjel debe proseguir en los años inmediatos, enfocada quizá, como a veces él nos apunta, a temas regionales más concretos, dentro del panorama general de la historia de la medicina española.

Este comentario no quiere ni pretende ser un amistoso ditirambo, sino la expresión objetiva de una opinión personal. En tal sentido quisiera apuntar una leve objeción a la obra: era posible, y hubiese sido conveniente, que el índice temático de la *Historia General de la Medicina Española* que figura al final del quinto volumen de la obra, tuviera mayor amplitud, multiplicando aún más las materias que en ella son consideradas. Y de otra parte, quisiera salir al paso de posibles objeciones: caben otras aproximaciones al conocimiento de nuestro pasado médico. Algunos apuntarán que tal aproximación debe de ser "exclusivamente" sociológica; otros dirán que "meramente" ideológica; algún otro señalará la importancia "primordial" del acercamiento estadístico. Todo ello es verdad, puede resultar valioso y, en parte, ya ha sido utilizado en esta obra. Pero estoy seguro de que, sean cuales fueren las discrepancias con el método de Granjel, "todos" tendrán que acudir a su *Historia* cuando intenten ensayar otros métodos historiográficos. (A. A.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

PRODUCCION FOTOQUIMICA DE PEROXIDO DE HIDROGENO

PHOTOPRODUCTION OF AMMONIA AND HYDROGEN PEROXIDE. Manuel Losada en *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, vol. 6, págs. 205-225; 1979.

CONTINUOUS PHOTOCHEMICAL PRODUCTION OF HYDROGEN PEROXIDE BY FLAVINS. Agustín G. Fontes, Francisco F. de la Rosa y Carlos Gómez-Moreno en *Photobiochemistry and Photobiophisics*, vol. 2, págs. 355-364; diciembre, 1983.

ENERGY RESOURCES THROUGH PHOTOCHEMISTRY AND CATALYSIS. Dirigido por Michael Grätzel. Academic Press, 1983.

A LASER FLASH PHOTOLYSIS STUDY OF THE PHOTOREDUCTION OF THE LUMIFLAVIN TRIPLET STATE. Paul F. Heelis, Miguel A. de la Rosa y Gordon O. Phillips en *Photobiochemistry and Photobiophysics*, vol. 9, págs. 57-63; marzo, 1985.

SISTEMAS FOTOQUÍMICOS PRODUCTORES DE COMPUESTOS ENERGÉTICOS. Miguel A. de la Rosa, José A. Navarro, Mercedes Roncel y Francisco F. de la Rosa en *Química e Industria*, vol. 31, n.º 7-8, págs. 497-501; julio-agosto, 1985.

CAOS

DYNAMICS: THE GEOMETRY OF BEHAVIOR. Ralph Abraham y Chris Shaw. Aerial Press, P.O. Box 1360, Santa Cruz, California 95061, Estados Unidos; 1982-85.

DETERMINISTIC CHAOS: AN INTRODUCTION. H. G. Schuster. VCH Publishers, Inc., 1984.

THE EUDAEMONIC PIE: OR WHY WOULD ANYONE PLAY ROULETTE WITHOUT A COMPUTER IN HIS SHOE? Thomas A. Bass. Houghton-Mifflin, 1985.

DIMENSIONS AND ENTROPIES IN CHAOTIC SYSTEMS. Dirigido por G. Mayer-Kress. Springer-Verlag, 1986.

MATERIA OSCURA DEL UNIVERSO

DARK MATTER AND INFLATION. Lawrence M. Krauss en *General Relativity and Gravitation*, vol. 17, n.º 1, págs. 89-94; enero, 1985.

INNER SPACE, OUTER SPACE. Dirigido por E. W. Kolb, M. S. Turner, D. Lindley, K. Olive y D. Seckel. University of Chicago Press, 1986.

SOLAR SYSTEM CONSTRAINTS AND SIGNATURES FOR DARK-MATTER CANDIDATES. Lawrence M. Krauss, Mark Srednicki y Frank Wilczek en *Physical Review D*, vol. 33, n.º 8, págs. 2079-2083; 15 de abril de 1986.

THE MEAN MASS DENSITY OF THE UNIVERSE. P. J. E. Peebles en *Nature*, vol. 321, n.º 6065, págs. 27-32; 1 de mayo de 1986.

EL PRIMER RETROVIRUS HUMANO

HUMAN T-CELL LEUKEMIA/LYMPHOMA VIRUSES ATL AND AIDS. R. C. Gallo y W. A. Blattner en *Important Advances in Oncology, 1985*, dirigido por Vincent T. DeVita, Samuel Hellman y Steven A. Rosenberg. J.B. Lippincott Co., 1985.

HUMAN T-CELL LEUKEMIA VIRUSES (HTLV): A UNIQUE FAMILY OF PATHOGENIC RETROVIRUSES. Samuel Broder y Robert C. Gallo en *Annual Review of Immunology*, vol. 3, págs. 321-336; 1985.

HUMAN T-LYMPHOTROPIC RETROVIRUSES. Flossie Wong-Staal y Robert C. Gallo en *Nature*, volumen 317, número 6036, págs. 395-403; 3 de octubre de 1985.

ARQUITECTURA FUNCIONAL DE LA RETINA

THE STRUCTURE OF THE RETINA. Santiago Ramón y Cajal. Charles C. Thomas, 1972.

DENDRITIC TERRITORIES OF CAT RETINAL GANGLION CELLS. H. Wässle, L. Peichl y B. B. Boycott en *Nature*, vol. 292, n.º 5821, págs. 344-345; 23 de julio de 1981.

THE SHAPE AND ARRANGEMENT OF THE CHOLINERGIC NEURONS IN THE RABBIT RETINA. M. Tauchi y R. H. Masland en *Proceedings of the Royal Society of London, Series B*, vol. 223, n.º 1230, págs. 101-119; 22 de noviembre de 1984.

THE RETINA-FROM MOLECULES TO NETWORKS. *Trends in Neuroscience*, volumen 9, n.º 5; mayo, 1986.

RESPUESTA DE LAS RAICES A LA GRAVEDAD

REVERSIBLE LOSS OF GRAVITROPIC SENSITIVITY IN MAIZE ROOTS AFTER TIP APPLICATION OF CALCIUM CHELATORS. June S. Lee, Timothy J. Mulkey y Michael L. Evans en *Science*, vol. 220, n.º 4604, págs. 1375-1376; 24 de junio de 1983.

REGULATION OF ROOT DEVELOPMENT. L. J. Feldman en *Annual Review of Plant Physiology*, vol. 35, págs. 223-242; 1984.

HOW ROOTS PERCEIVE AND RESPOND TO GRAVITY. Randy Moore y Michael L. Evans en *American Journal of Botany*, vol. 73, n.º 4, págs. 574-587; abril, 1986.

HIDRONAVES DE TRACCION HUMANA

THE FLYING FISH HYDROFOIL. Alec N. Brooks en *Human Power*, vol. 3, n.º 2, págs. 1, 7-8; invierno, 1984.

PROCEEDINGS OF THE THIRD INTERNATIONAL HUMAN POWERED VEHICLE SCIENTIFIC SYMPOSIUM. Dirigido por Allan V. Abbott. International Human Powered Vehicle Association, P.O. Box 51255, Indianapolis, Ind. 46251; 1986.

UN COMPLEJO DE APARTAMENTOS ROMANOS

THE SECRETS OF ANCIENT GEOMETRY-AND ITS USE. Tons Brunés. Rhodos International Science and Art Publishers, Copenhagen, 1967.

ROMAN OSTIA. Russell Meiggs. Oxford University Press, 1973.

SACRED GEOMETRY: PHILOSOPHY AND PRACTICE. Robert Lawlor. Crossroad Publishing Co., 1982.

JUEGOS DE ORDENADOR

DISTRIBUTED RAY TRACING. Robert L. Cook, Thomas Porter y Loren Carpenter en *Computer Graphics*, vol. 18, n.º 3, págs. 137-145; julio, 1984.

3-D FRACTALS. Michiel van de Panne en *Creative Computing*, vol. 11, n.º 7, págs. 78-82; julio, 1985.

TALLER Y LABORATORIO

AN EXCURSION IN LABYRINTHS. Oystein Ore en *The Mathematics Teacher*, vol. 52, n.º 5, págs. 367-370; mayo, 1959.

GRAPHS, MODELS, AND FINITE MATHEMATICS. Joseph Malkevitch y Walter Meyer. Prentice-Hall, Inc., 1974.